

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

Détermination de la plus-value de la télédétection  
pour le suivi des niveaux d'eau et du bilan hydrique :  
Application au réservoir Eastmain-1

Mémoire de maîtrise

Spécialité : génie civil

Sébastien LANGLOIS

Sherbrooke (Québec) Canada

Avril 2020

## MEMBRES DU JURY

Robert LECONTE

---

Directeur

Mélanie TRUDEL

---

Rapporteuse

Sylvain BIANCAMARIA

---

Évaluateur

## RÉSUMÉ

Le nouvel altimètre radar SWOT va permettre de produire des cartographies à haute résolution des niveaux des eaux de surface à partir de 2021. L'objectif du projet est de déterminer en quoi ce satellite à haute-résolution peut être comparé avec les stations de mesures de niveaux d'eau *in situ* dans le but d'améliorer la couverture spatio-temporelle de l'estimation des niveaux d'eau des réservoirs et lacs jaugés ou non. De plus, il sera question d'évaluer la qualité du bilan hydrique estimée par le satellite. Pour y arriver, le réservoir Eastmain-1 a été modélisé par éléments finis à l'aide du modèle hydrodynamique TELEMAC. Des images synthétiques de SWOT ont été constituées à l'aide des simulateurs SWOT-HR créé par le JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) pour évaluer les erreurs de classification du terrain et SWOT-LS créé par le CNES (Centre National d'Études Spatiales) pour générer des images synthétiques de niveaux d'eaux à partir de ceux calculés par TELEMAC. Il a été démontré que pour un réservoir de la taille d'Eastmain-1, les images SWOT synthétiques cumulées sur une période de 5 mois ont une erreur quadratique moyenne sur l'estimation du niveau moyen de l'eau de l'ordre d'environ 1,5 cm. Sur le long terme, il a été montré que les niveaux d'eau simulés SWOT semblent avoir un léger biais de -3 mm par rapport aux niveaux du modèle TELEMAC. Le volume au réservoir et une estimation des apports calculés à partir d'images synthétiques SWOT donnent des séries temporelles relativement peu bruitées.

Mots-clés : SWOT, bilan hydrique, télédétection, hydrodynamique, TELEMAC, altimétrie radar, interférométrie radar, réservoir

## REMERCIEMENTS

Je remercie grandement mon directeur de mémoire, Robert Leconte, pour le temps qu'il m'a accordé, les nombreux conseils, les campagnes de jaugeages qu'il m'a permis de réaliser à l'extérieur de la province, les conférences auxquelles j'ai pu assister et les fameux soupers de Noël en équipe. Avant de me lancer dans mon mémoire, je n'avais entendu que de bons commentaires de la part de ses anciens étudiants. Je me joins donc aujourd'hui à eux pour signifier pour appréciation. Je remercie également Mélanie Trudel pour son support et son implication comme rapporteuse de ce mémoire. Avec Mélanie, on peut parler de TOUT : hydrologie et télédétection certes, mais aussi de la comptabilité à la gestion d'une ferme! Je remercie également Sylvain Biancamaria pour avoir évalué ce mémoire. L'expertise de M. Biancamaria est fortement reconnue dans le domaine de la télédétection pour le suivi des niveaux d'eau.

Je tiens également à remercier mes collègues de l'Université de Sherbrooke qui ont rendu cette expérience particulièrement agréable et enrichissante. Un merci particulier à Jean Bergeron, Gabriela Llanet Siles, Didier Haguma, Hassan Rouhani, Mohammad Bizhanimanazar et Yannick Duguay.

Je remercie également le Fonds de Recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) pour leur soutien financier.

Je remercie également mes amis et ma famille. Plusieurs de mes amis ont réalisé leur mémoire en même temps que moi et leur soutien moral a été d'un grand réconfort. Je ne peux passer sous le silence la réaction de ma sœur, ma mère, mon père et mes beaux-parents qui après 2, 3 ...4 (4,5?) ans me disaient tous à chaque fois qu'il me questionnait sur l'avancement de mon mémoire : « Quoi!? Tu n'as pas encore fini ta maîtrise? ». À celles et ceux qui voudraient, comme moi, réaliser un mémoire ou une thèse en même temps de travailler à temps plein, je vous souhaite : « Bonne chance ! »

Enfin, ma fiancée Sara Rahme m'a été d'un support incomparable lors de cette longue épreuve. Je la remercie pour son soutien, son amour, son encouragement et surtout sa patience! Nous aurons finalement plus de temps à consacrer à d'autres projets ensemble. ☺

# TABLE DES MATIÈRES

Membres du Jury.....	i
Résumé .....	ii
Remerciements .....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	xi
Chapitre 1 Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique de l'étude.....	4
1.3 Objectifs .....	6
1.4 Hypothèses.....	7
1.5 Présentation des chapitres.....	8
1.5.1 Chapitre 2 : Suivi des niveaux d'eau et du bilan hydrique : état de l'art.....	8
1.5.2 Chapitre 3 : Modélisation hydrodynamique 2D et 3D du réservoir Eastmain-1 .....	8
1.5.3 Chapitre 4 : Génération des images SWOT synthétiques et estimation de la qualité du bilan hydrique.....	9
1.5.4 Chapitre 5 : Conclusion.....	9
Chapitre 2 Suivi des niveaux d'eau et du bilan hydrique : état de l'art.....	10
2.1 Principes et théorie de la télédétection des plans d'eau .....	10
2.1.1 Altimétrie radar.....	10
2.1.2 Radar à synthèse d'ouverture .....	12
2.1.3 Interférométrie radar .....	13
2.2 L'estimation de niveaux d'eau et de débits par télédétection spatiale : revue historique .	14
2.2.1 De Geosat à Jason-3 : applications pour l'hydrologie continentale.....	15
2.2.2 Limitations de la technologie actuelle .....	17
2.2.3 Mission contemporaine : SWOT .....	18
2.3 Estimation du bilan hydrique .....	23

2.4	Utilisation de l'assimilation de données dans un modèle hydrodynamique.....	26
2.4.1	Utilisation de l'assimilation de données en hydrodynamique.....	26
2.4.2	SWOT: Expérience de simulation de système d'observation.....	27
Chapitre 3	Modélisation hydrodynamique 2D et 3D du réservoir Eastmain-1 .....	31
3.1	Caractérisation du domaine d'étude .....	31
3.1.1	Contexte .....	31
3.1.2	Données disponibles .....	33
3.2	Description du modèle TELEMAC.....	36
3.2.1	Contexte .....	36
3.2.2	Éléments théoriques .....	36
3.3	Mise en œuvre du modèle .....	37
3.3.1	Maillage.....	38
3.3.2	Conditions aux limites.....	41
3.3.3	Sollicitations externes .....	43
3.3.4	Configuration de la modélisation.....	45
3.4	Simulations .....	46
3.4.1	Analyse de sensibilité du paramètre de frottement .....	46
3.4.2	Impact des conditions aux limites .....	47
3.4.3	Impact du vent et validations .....	50
3.4.4	Modélisation 3D.....	51
Chapitre 4	Génération des images synthétiques SWOT et estimation de la qualité du bilan hydrique	56
4.1	Simulateurs du satellite SWOT.....	56
4.1.1	Fonctionnement de SWOT-HR et SWOT-LS .....	56
4.2	Modélisation du réservoir Eastmain-1 avec SWOT-HR et SWOT-LS.....	59
4.2.1	Intrants aux simulateurs SWOT-HR et SWOT-LS .....	59
4.2.2	Image SWOT-HR : classification du terrain .....	60

---

4.2.3	Image SWOT-LS : niveau d'eau .....	62
4.2.4	Correction pour la couverture partielle.....	65
4.2.5	Évaluation du niveau et du volume d'eau .....	68
4.2.6	Reconstitution des apports par bilan hydrique.....	71
Chapitre 5	Conclusion .....	74
Annexe A	Expérimentations de l'assimilation de données dans un modèle hydrodynamique .....	78
A.1	Principe de l'assimilation de données .....	79
A.1.1	Meilleur estimateur linéaire sans biais (MELSB) .....	79
A.1.2	Filtre de Kalman.....	82
A.1.3	Filtre de Kalman d'ensemble.....	83
A.2	Conditions des cas d'écoulement .....	85
A.2.1	Cas d'écoulement .....	85
A.2.2	Calage dynamique du modèle.....	86
A.2.3	Résultats.....	89
A.3	Correction des niveaux d'eau sur l'ensemble du domaine.....	95
A.3.1	Méthodologie.....	95
A.3.2	Résultats.....	96
A.4	Discussion .....	100
Références	.....	102

# LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 a) Débit de rivière b) Débit reconstitué par bilan hydrique © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission .....	5
Figure 2-1 Présentation du concept d'altimétrie radar. Modifié de NASA and NOAA Altimetric and Ocean Surface Topography Data Information [2017] .....	11
Figure 2-2 Amélioration de la résolution spatiale avec le radar à synthèse d'ouverture [Christian Wolff, 2017] .....	12
Figure 2-3 Principe de l'interférométrie radar. Modifié de Hanssen [2010] .....	13
Figure 2-4 Évolution des missions les plus importantes pour l'altimétrie des niveaux d'eau. Adapté de NASA and NOAA Altimetric and Ocean Surface Topography Data Information [2017] .....	14
Figure 2-5 Schéma des interféromètres et de l'altimètre au nadir du satellite SWOT (Traduit de JPL/NASA, 2015) .....	18
Figure 2-6 Schéma explicatif de la méthode « Expérience de simulation de système d'observation ». Traduit de Pedinotti [2013]. L'encadré de couleur rouge montre les étapes réalisées par un simulateur d'images SWOT .....	29
Figure 3-1 Délimitation du bassin versant d'Eastmain-1 et le système hydrique de La Grande © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission .....	32
Figure 3-2 Positionnement des stations hydrométriques d'Hydro-Québec sur le bassin versant d'Eastmain-1 et le canal de dérivation Rupert © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission .....	33
Figure 3-3 Débit moyen pour la période de 2006 à 2016. © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission .....	34
Figure 3-4 Précipitation annuelle au réservoir Eastmain-1 .....	35
Figure 3-5 Température maximale et minimale journalière moyenne .....	35
Figure 3-6 Digues présentes sur le réservoir d'Eastmain-1 © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission .....	39
Figure 3-7 Présentation du maillage global et de la bathymétrie du réservoir Eastmain-1 (m) .....	40
Figure 3-8 Maillage aval du modèle .....	41
Figure 3-9 Maillage amont du modèle .....	41



Figure 3-10 Sections définies comme conditions aux limites ouvertes pour le réservoir Eastmain-1. Les conditions frontières en bleu représentent les limites entrantes alors que les conditions frontières en turquoise représentent les limites sortantes. La condition frontière 1* n'a pas été retenue dans le modèle final (voir explication ci-dessous).....	42
Figure 3-11 Distribution de l'intensité et de la direction de provenance du vent sur le réservoir Eastmain-1 .....	44
Figure 3-12 Apports et débits sortants du réservoir Eastmain-1 en 2015.....	45
Figure 3-13 Évolution du niveau d'Eastmain-1 estimé par la station RESEAST.MSAT en 2015 .	46
Figure 3-14 Évolution du niveau moyen (m) du réservoir Eastmain-1 en fonction du coefficient de Manning global du modèle .....	47
Figure 3-15 Comparaison du niveau moyen (m) du réservoir en fonction du scénario aux conditions limites.....	48
Figure 3-16 Comparaison des scénarios avec 1 et 2 exutoires par rapport au niveau d'eau de la station RESEAST.MSAT ( $1q_{1qb}$ et $1q_{2qb}$ ), vitesse de vent nulle.....	49
Figure 3-17 Comparaison de la distribution des scénarios avec 1 et 2 exutoires le 01 juillet 2015 ( $1q_{1qb}$ et $1q_{2qb}$ ), vitesse de vent nulle.....	49
Figure 3-18 Comparaison des niveaux d'eau (m) des simulations 2D avec et sans vent (gauche et droite) le 27 septembre 2015 .....	50
Figure 3-19 Évolution du niveau d'eau à la station RESEAST.MSAT le 27 septembre 2015 .....	51
Figure 3-20 Niveau d'eau (m) de la simulation 3D le 27 septembre 2015.....	52
Figure 3-21 Écart-type de la distribution des pixels du niveau et la dérivée première du niveau d'eau par rapport au temps .....	53
Figure 3-22 Comparaison du débit observé sortant à Eastmain-1A et celui simulé par TELEMAC-3D.....	53
Figure 3-23 Comparaison de la profondeur d'eau (m) du réservoir Eastmain-1 au 01 mai (haut) et au 30 septembre 2015 (bas) .....	54
Figure 3-24 Comparaison de la différence de hauteur d'eau (m) du réservoir Eastmain-1 au 01 mai au 30 septembre 2015.....	55
Figure 4-1 – Schéma des principales composantes du simulateur SWOT-HR .....	57
Figure 4-2 Schéma des principales composantes du simulateur SWOT-LS .....	59

Figure 4-3 Passages de SWOT sur le domaine du réservoir Eastmain-1, représenté ici par sa bathymétrie .....	60
Figure 4-4 Comparaison de la classification de SWOT pour le passage 0119 .....	61
Figure 4-5 Classification du simulateur SWOT-HR pour le passage 0119 pour les pixels qui auraient dû être considéré comme du sol .....	62
Figure 4-6 Orbite 0119 du cycle 0001 le 05 mai 2015 05h00 .....	63
Figure 4-7 Orbite 0298 du cycle 0001 le 11 mai 2015 14h00 .....	63
Figure 4-8 Orbite 0425 du cycle 0001 le 16 mai 2015 04h00 .....	63
Figure 4-9 Orbite 0576 du cycle 0001 le 21 mai 2015 13h00 .....	64
Figure 4-10 Évolution de l'erreur moyenne du niveau au réservoir (m) en fonction de l'orbite SWOT .....	64
Figure 4-11 image SWOT à couverture partielle (cycle 0001 – orbite 298) (à gauche) et résultats du modèle d'apprentissage supervisé de l'équation 4-12 (à droite) .....	66
Figure 4-12 Comparaison de l'écart d'images SWOT et la simulation théorique (vérité) .....	69
Figure 4-13 Volume d'eau réel (calculé par Hydro-Québec) et estimé par les images SWOT synthétiques prédites sur l'ensemble du réservoir Eastmain-1 .....	70
Figure 4-14 Différence du volume d'eau réel (calculé par Hydro-Québec) et estimé par les images SWOT synthétiques prédites sur l'ensemble du réservoir Eastmain-1 lors de l'acquisition des images SWOT synthétiques .....	71
4-15 Apports calculés à partir des images SWOT et du bilan hydrique réalisé par Hydro-Québec	72
Figure A-1 Processus d'assimilation du filtre de Kalman d'ensemble. Modifié de Abbasi et al. [2019] .....	84
Figure A-2 Domaine d'étude pour l'assimilation de données dans le modèle TELEMAC-2D.....	86
Figure A-3 Distribution de la hauteur d'eau atteinte pour un débit constant de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	89
Figure A-4 Évolution du niveau moyen de l'eau en fonction du coefficient de Manning (domaine A.2.1.1).....	90
Figure A-5 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 50 secondes selon la valeur de départ (20 membres).....	91
Figure A-6 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 100 secondes selon la valeur de départ (20 membres).....	92

Figure A-7 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 250 secondes selon la valeur de départ (20 membres).....	92
Figure A-8 Distribution de la hauteur d'eau (m) atteinte pour un débit constant de 5000 m <sup>3</sup> /s....	93
Figure A-9 Évolution du niveau moyen de l'eau en fonction du coefficient de Manning (domaine 5.2.1.2).....	94
Figure A-10 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 250 secondes selon la valeur de départ (20 membres).....	94
Figure A-11 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 50 secondes selon la valeur de départ (20 membres).....	95
Figure A-12 Comparaison des apports et des niveaux après application de bruit gaussien sur le jeu considéré comme « vérité ».....	96
Figure A-13 Comparaison du niveau moyen estimé par le modèle hydrodynamique bruité, les observations et les 60 membres d'ensemble .....	97
Figure A-14 Comparaison des apports et des niveaux après application de bruit gaussien sur le jeu considéré comme « vérité ».....	98
Figure A-15 Comparaison du niveau moyen estimé par le modèle hydrodynamique bruité, les observations et les 60 membres d'ensemble .....	99

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Synthèse des missions mesurant des niveaux d'eau (océaniques et/ou continentaux)	15
Tableau 2-2 Paramètres de la mission scientifique SWOT [Biancamaria et al., 2010; Domeneghetti et al., 2018] .....	19
Tableau 3-1 Caractéristiques des stations disponibles pour la modélisation hydrodynamique de Eastmain-1 .....	34
Tableau 3-2 Type de conditions aux limites du modèle TELEMAC.....	41
Tableau 3-3 Scénarios évalués pour les conditions aux limites du modèle TELEMAC-2D .....	42
Tableau 3-4 Comparaison de la moyenne et de l'écart-type des niveaux d'eau (m) lors de la date du 01 juillet 2015.....	50
Tableau 4-1 Comparaison des niveaux d'eau moyens pour chaque cycle et orbite SWOT sur le réservoir Eastmain-1.....	67
Tableau A-1 Définition des paramètres du MELSB.....	80
Tableau A-2 Distribution et paramètres des lois multinormales (modèle et observations) .....	81
Tableau A-3 Détermination des paramètres du MELSB .....	82
Tableau A-4 Comparaison des erreurs entre deux conditions d'écoulement (domaines A.2.1.1 et A.2.1.2).....	99



# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

## 1.1 Mise en contexte

Dans un contexte de croissance démographique et économique ainsi que de changements climatiques, la gestion de la ressource hydrique est amenée à devenir de plus en plus complexe [Veolia Water, 2011; Schlosser, 2014; OECD, 2012; Larrivée, 2010]. Au Québec particulièrement, l'eau couvre plus de 22% du territoire, ce qui représente environ 3% des réserves d'eau douce de la planète. La ressource est, entre autres, consommée par les secteurs municipaux, industriels et agricoles. Plusieurs plans d'eau sont également utilisés pour des fins récréatives (pêche, bateau, baignade, etc.). Enfin, il existe de nombreux barrages qui régulent le débit des rivières notamment pour la production hydroélectrique, l'irrigation et le contrôle des crues.

Bien que les barrages hydroélectriques soient présents au Québec depuis des décennies, il n'en demeure pas moins que la gestion de l'eau demeure un défi de taille. En effet, le gestionnaire de barrage doit constamment prendre des décisions quant à la gestion de l'eau dans un contexte où plusieurs contraintes lui sont imposées, et ce, dans un climat d'incertitude constant. Pour un barrage à réservoir, les exemples suivants illustrent les contraintes qui peuvent être exigées auprès d'un gestionnaire de barrage hydroélectrique :

- ❖ Assurer qu'un débit minimal soit constamment acheminé vers l'aval pour une utilisation par les municipalités, les industries et la faune ;
- ❖ Assurer qu'une quantité d'eau suffisante soit stockée dans le réservoir pour répondre à une importante demande d'électricité (par exemple, lors de la saison hivernale) ;
- ❖ Maintenir ou de ne pas dépasser certaines cotes de niveau d'eau pour des contraintes liées aux inondations ou aux activités récréatives ;
- ❖ Maximiser la hauteur de chute de l'eau ;
- ❖ Assurer un débit minimal pour préserver l'écosystème ;
- ❖ Se conformer à la Loi sur la sécurité des barrages ainsi que toute convention agréée avec les groupes concernés par l'exploitation de la ressource hydrique.

Les exemples ci-haut illustrent plusieurs contraintes qui peuvent être imposées simultanément au gestionnaire de barrage. Ces contraintes sont généralement imposées par la loi [Québec, 2016], par des accords avec les groupes impactés par l'exploitation d'un plan d'eau, par exemple les ententes avec les Premières Nations et les municipalités [Grand Conseil des Cris et al., 2002], par des politiques gouvernementales [Québec, 2002] et par des intérêts de rentabilité de la production hydroélectrique. Ainsi, le gestionnaire de barrage doit rendre des comptes à de multiples parties prenantes affectées par l'exploitation des plans d'eau, en tenant compte que leurs intérêts respectifs soient bien souvent divergents. Il doit exercer son jugement constamment afin de prendre la décision qui optimise l'utilisation de la ressource hydrique. Ce faisant, le gestionnaire doit non seulement tenir compte des effets à court terme de ses décisions (quelques jours), mais doit aussi en considérer les impacts à moyen (quelques semaines) et à long terme (quelques mois à quelques années).

D'un point de vue pratique, le levier de contrôle qu'il exerce sur un plan d'eau en exploitation est le débit d'eau sortant à l'exutoire du barrage, à l'aide de turbines ou d'évacuateurs de crues. C'est donc en déterminant la quantité d'eau optimale à évacuer du réservoir que le gestionnaire tente de répondre à l'ensemble des contraintes qui lui sont imposées. Pour déterminer cette quantité d'eau optimale, le gestionnaire doit avoir une bonne connaissance de l'état actuel de son bassin versant ainsi que de son état futur. Plus la connaissance de son bassin versant est grande, plus le gestionnaire pourra évaluer adéquatement la quantité d'eau à évacuer à un temps donné.

Étant donné la complexité des processus physiques qui influencent l'hydraulicité d'un bassin versant, le gestionnaire utilise deux sources d'information principales afin d'approximer l'état actuel et futur du bassin exploité. D'une part, il utilise des données d'observation pour décrire l'hydrologie du bassin versant. Ces variables sont observées ou dérivées à l'aide de stations de mesure sur le terrain et/ou de données obtenues par télédétection. Ces variables comprennent, entre autres, la superficie du territoire, les précipitations, la température, le stock de neige de même que des variables plus difficiles à estimer telles que l'humidité du sol et l'évapotranspiration. D'autre part, le gestionnaire utilise des modèles paramétrés afin d'estimer des variables qui sont très difficiles, voire impossibles à mesurer directement. Ces variables sont notamment les débits d'apports souterrains, intermédiaires et surfaciques qui cheminent naturellement vers l'exutoire du bassin versant. Les types de modèles

hydrologiques sont multiples (conceptuel, à base physique, etc.) et sont calés sur des données d'observation afin de mieux représenter la réalité.

Les débits qui cheminent naturellement vers l'exutoire d'un bassin versant sont une des variables les plus importantes pour le gestionnaire. En effet, la connaissance des débits permet au gestionnaire d'un barrage à réservoir d'opérer une gestion optimale de la ressource hydrique, d'une part, en minimisant les déversements non productifs par les vannes évacuatrices et d'autre part, en mitigeant les risques d'inondation, de ruptures de digue ou de barrage. Or, comme cette variable n'est pas mesurable directement, le gestionnaire doit l'approximer. Pour ce faire, celui-ci peut faire appel à deux options, présentant chacune des avantages et des inconvénients.

En premier lieu, celui-ci peut utiliser un modèle hydrologique, comme mentionné plus haut. Le modèle hydrologique permet d'estimer les débits à partir de variables météorologiques et de conditions initiales. Toutefois, ce qui est plus intéressant encore est qu'en utilisant en intrant à ce modèle des prévisions météorologiques, il est possible de faire une prévision des débits sur un horizon de quelques jours à quelques mois. Cette information est cruciale pour la gestion de la ressource hydrique en mode opérationnel. Par contre, le principal désavantage du modèle hydrologique réside dans le fait que la qualité du modèle est très dépendante de la qualité du calage, laquelle dépend de la qualité, de la disponibilité et de la représentativité des données d'observation ayant servi à caler le modèle. Également, les données requises comme intrants au modèle hydrologique ne sont pas toujours disponibles ou de bonne qualité. De plus, la performance de certains modèles varie drastiquement selon les caractéristiques du domaine d'application (par exemple : un grand par rapport à un petit bassin versant). Enfin, il convient de rappeler que le débit calculé par le modèle hydrologique est approximatif et qu'un débit de plus grande précision peut être requis pour certaines applications.

D'autre part, les débits entrant au réservoir (appelés apports) peuvent aussi être estimés par la conservation de la masse (bilan hydrique). En effet, les apports s'estiment en soustrayant les débits totaux sortants (déversés et turbinés) d'un barrage de la variation du volume d'eau contenue dans son réservoir. Les débits sortants sont estimés directement par des relations hydrauliques. Le volume d'eau contenu dans un réservoir est estimé en connaissant les niveaux d'eau et la bathymétrie (topographie) d'un réservoir. Par ailleurs, il est important de mentionner que le niveau d'eau est défini dans le cadre



de ce travail comme la distance entre la surface d'eau et une surface de référence, tel que le géoïde ou l'ellipsoïde. Cette méthode d'estimation des débits est donc directement dérivée des observations, ce qui devrait mieux approximer la réalité. Or, il subsiste encore beaucoup d'incertitudes sur les données de niveau des réservoirs causées entre autres par leur faible couverture spatiale, la qualité de la bathymétrie, les effets du vent ou les effets de seiche. Ce faisant, les données d'apports reconstitués par bilan hydrique peuvent être très bruitées et donc, moins précises que souhaité.

Pour le responsable de barrage, la gestion de la ressource hydrique est donc synonyme de gestion des incertitudes. Ces incertitudes sont associées aux modèles et aux données d'observation dont il dispose afin d'accomplir son travail. Des modèles plus performants ainsi qu'un accroissement de la disponibilité et de la qualité des données d'observation permettraient aux gestionnaires d'optimiser la gestion de la ressource hydrique. En particulier, une meilleure compréhension des étendues d'eau et des apports pourrait être significative pour la rentabilité de la production hydroélectrique (minimisation des déversements, planification des travaux de réfection) ainsi que pour la sécurité de l'exploitation (prévision et contrôle des crues extrêmes). Une des possibilités qui mérite d'être étudiée est d'utiliser des produits issus de la télédétection. En effet, depuis plusieurs années, la télédétection est en essor et pourrait représenter une source d'observations complémentaires aux observations traditionnelles de niveau d'eau et de débit.

## 1.2 Problématique de l'étude

Comme énoncé dans l'introduction, une bonne compréhension de l'état des **niveaux d'eau** et des **débits entrant** au réservoir d'un barrage permet de raffiner la qualité des prévisions hydrologiques [Boucher, 2011] ainsi que la gestion de la ressource hydrique. Toutefois, il est très coûteux et complexe de mesurer directement ces apports au réservoir depuis ses multiples affluents. En effet, le coût de la mise en place et surtout de l'entretien d'une station de mesure de débit (courbe de tarage) est très élevé. Il serait non rentable d'en installer une pour chacun des dizaines de tributaires qui alimentent un réservoir [Deng et al., 2015a]. La figure 1-1a présente le cas d'un débit mesuré directement en rivière. En comparaison, la figure 1-1b présente un cas d'un débit reconstitué par bilan hydrique. Le débit de la seconde figure est hautement bruité par rapport à la première. Bien qu'il soit possible d'appliquer des filtres pour lisser la série de débits, ceux-ci peuvent engendrer une perte d'information

dans le signal, notamment au niveau des pointes de crue. Pire encore, ces débits sont utilisés pour caler des modèles hydrologiques et comme conditions initiales pour des prévisions hydrométéorologiques.

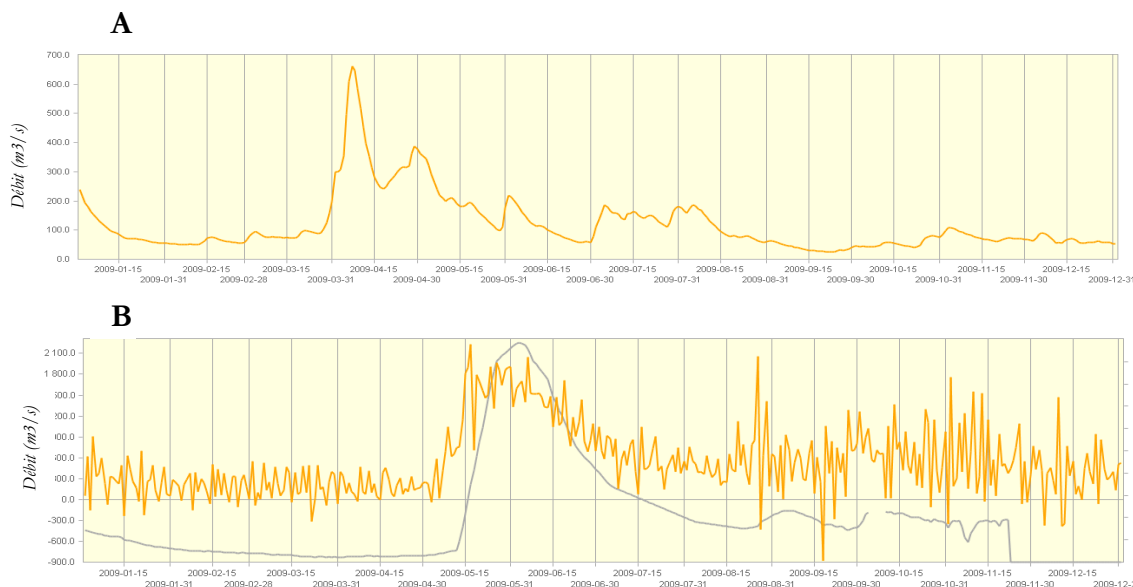


Figure 1-1 a) Débit de rivière b) Débit reconstitué par bilan hydrique © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission

Généralement, la bathymétrie et l'estimation des débits sortants sont connues avec une précision suffisante, mais la connaissance des niveaux d'eau est très faible [Jalbert et al., 2011]. En effet, les niveaux des réservoirs sont généralement mesurés à l'aide de quelques stations de mesures *in situ*. En général, une à quatre stations de mesures sont installées par réservoir. La couverture spatiale du niveau d'eau d'un réservoir est au mieux très grossière, car une station de mesure peut moyenner l'estimation d'un niveau d'eau jusqu'à une superficie de plusieurs centaines de kilomètres carrés sur les grands réservoirs de dizaine à centaine de kilomètres carrés de superficie. De plus, les stations de mesure sont ponctuellement perturbées par des effets locaux (vents, vagues, pente, remous, etc.). La faible connaissance des niveaux d'eau crée donc un problème important de bruit dans l'estimation des apports, tel que montré à la figure 1-1b. Il est d'ailleurs attendu que ces problèmes s'accroissent dans l'avenir, puisque le nombre de stations hydrométriques (niveaux et/ou débits) en opération dans les pays développés est en déclin, du fait que les entreprises et les agences gouvernementales cherchent à réduire leurs coûts d'opération [Yoon et al., 2012a].

Actuellement, plusieurs prévisionnistes ou gestionnaires de barrage au Québec corrigent l'estimation des débits reconstitués par bilan hydrique en les filtrant de manière subjective. Cela signifie que les données sont lissées en fonction de la connaissance du prévisionniste (ou gestionnaire) de son bassin versant. Celui-ci utilise le support de modèles hydrologiques et de stations de mesures de débits à proximité du point d'intérêt. Ainsi, cette opération subjective implique que deux prévisionnistes risquent de filtrer différemment un même scénario de débit. Il subsiste donc toujours un potentiel important d'amélioration de l'estimation des niveaux d'eau et par conséquent, des débits reconstitués par bilan hydrique.

Une avancée majeure a été réalisée par des chercheurs du LEGOS (Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiale) qui ont mis en ligne dès 2011 un outil de suivi des niveaux d'eau pour environ 150 lacs et réservoirs à travers le globe [Crétaux et al., 2011]. Ils ont compilé des données provenant des missions Topex–Poseidon, GFO, ERS-2, Jason-1, Jason-2 et Envisat pour créer des séries temporelles de niveaux d'eau. Parmi les réservoirs exploités par Hydro-Québec, on retrouve Caniapiscau et Opinaca dont des données sont disponibles de 2003 à 2010. Malgré cette avancée, le suivi des niveaux d'eau pour l'hydrologie continentale est limité avec ces satellites par leur faible résolution spatiale [Crétaux et al., 2011]. Aujourd'hui, les satellites Sentinel-3 (lancé en 2016) et Surface Water Ocean Topography (SWOT) (mise en orbite prévue en 2021) offrent une résolution spatiale conciliable avec des applications en hydrologie continentale et offrent un fort potentiel pour des réservoirs de taille plus faible ou dont la pente du plan d'eau peut être importante.

Ce faisant, la question de recherche suivante est posée :

*Quelle serait la plus-value des nouveaux altimètres radars à haute résolution, notamment SWOT, afin d'améliorer la connaissance spatiotemporelle des niveaux d'eau des réservoirs et par conséquent, les débits reconstitués par bilan hydrique ?*

### 1.3 Objectifs

Une meilleure connaissance des niveaux d'eau et des apports calculés par bilan hydrique permettrait d'optimiser la gestion de la ressource hydrique. Dans le cadre de cette recherche, les objectifs 1 et 2

décrits ci-dessous cherchent à déterminer comment améliorer l'estimation de ces deux variables dans un contexte de gestion de réservoirs à Eastmain-1 :

1. Quantifier la qualité de l'estimation des niveaux d'eau des réservoirs et/ou des lacs naturels à partir d'images synthétiques d'un simulateur du satellite SWOT
2. Améliorer la qualité des apports calculés par bilan hydrique
  - a. Déterminer la plus-value de SWOT relativement au calcul des apports par bilan hydrique
  - b. Réduire le bruit dans l'estimation des apports (valeurs négatives causées par le vent, les manœuvres, etc.)

## 1.4 Hypothèses

L'étude du satellite SWOT, dont la mise en orbite est prévue en 2021, implique qu'il n'existe actuellement pas d'images captées par le satellite. Ceci implique qu'il est nécessaire de travailler dans un environnement synthétique et de se constituer un jeu d'images SWOT. Pour y arriver, le recours à une modélisation hydrodynamique (chapitre 3) et à un simulateur du satellite SWOT (chapitre 4) est nécessaire afin de constituer cet échantillon d'images synthétiques. Ainsi, cette méthodologie repose sur quelques hypothèses qui se doivent d'être étayées :

1. D'abord, il est considéré que la modélisation hydrodynamique représente un état vraisemblable des niveaux d'eau du réservoir Eastmain-1.
2. Également, il est supposé que le paramètre de frottement n'a pas un impact significatif sur la modélisation des niveaux d'eau dans le réservoir Eastmain-1, étant donné sa masse élevée. Cette hypothèse est validée au chapitre 3.
3. De plus, il est considéré que les images SWOT synthétiques seront représentatives des images SWOT attendues du satellite.
4. Par ailleurs, étant donné la grande superficie du réservoir, la couverture des images SWOT est partielle, et ce, pour toutes les orbites du cycle du satellite. Il est supposé que les images SWOT peuvent être utiles pour faire le suivi des eaux malgré leur couverture partielle. Cette hypothèse est validée au chapitre 4.

## **1.5 Présentation des chapitres**

À l'exception du présent chapitre, l'ensemble des chapitres constituant ce mémoire est présenté dans cette section.

### **1.5.1 Chapitre 2 : Suivi des niveaux d'eau et du bilan hydrique : état de l'art**

Les principes fondamentaux de l'altimétrie radar, du radar à synthèse d'ouverture et de l'interférométrie radar pour le suivi des niveaux d'eau sont d'abord présentés. Comme le suivi des niveaux d'eau par télédétection est une discipline datant de plusieurs décennies, une multitude de satellites ont vu le jour. Une revue historique de l'utilisation de ces satellites, dont l'application primaire est le suivi des océans, est réalisée. Plusieurs applications originales de ces satellites pour l'hydrologie continentale et les limitations dans ce contexte sont également présentées. Le satellite SWOT, dont les applications sont prévues à la fois pour l'hydrologie océanographique et continentale, a un potentiel énorme de répondre aux besoins actuels en hydrologie continentale. Ses caractéristiques et des exemples de son utilisation potentielle sont abordés.

De manière générale, les éléments décrits ci-dessus présentent l'application de la télédétection dans le but d'évaluer les niveaux des lacs et réservoirs. Or, la qualité du bilan hydrique peut également être améliorée par d'autres approches, notamment en bonifiant la relation entre le niveau et le volume d'eau dans les lacs et réservoirs. Ces approches complémentaires sont également étudiées dans le cadre de ce chapitre.

### **1.5.2 Chapitre 3 : Modélisation hydrodynamique 2D et 3D du réservoir Eastmain-1**

La caractérisation du domaine d'étude, Eastmain-1, et l'ensemble des stations de mesures disponibles sont d'abord discutés. Le modèle hydrodynamique utilisé pour simuler des niveaux au réservoir Eastmain-1 et une description sommaire de son fonctionnement sont décrits. Par la suite, la mise en œuvre du modèle et la validation de celui-ci est étudié. Des simulations en 2 dimensions (2D) et 3 dimensions (3D) sont alors réalisées. L'impact des hypothèses aux conditions limites du modèle, de même que l'effet de la présence du vent sont étudiés afin d'évaluer leurs impacts sur les niveaux d'eau

simulés au réservoir. Une analyse de sensibilité du paramètre de frottement est également réalisée et permet de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse 2 décrite à la section 1.4. Enfin, la simulation hydrodynamique finale est retenue et est utilisée comme intrants pour la génération d'images synthétiques SWOT.

### **1.5.3 Chapitre 4 : Génération des images SWOT synthétiques et estimation de la qualité du bilan hydrique**

La génération d'images SWOT synthétiques est réalisée à l'aide de simulateurs du satellite SWOT. Les deux simulateurs SWOT-HR et SWOT-LS sont employés. SWOT-HR est un simulateur plus complet, mais comporte des limitations pour les applications à grande surface. Le simulateur SWOT-HR est utilisé principalement afin d'évaluer les erreurs de classification de pixels pour le domaine d'étude. Par la suite, le simulateur SWOT-LS, dont des hypothèses simplificatrices facilitent sa rapidité d'exécution, est utilisé pour une application à grande surface : la génération d'images SWOT synthétiques. Ces images sont analysées afin de répondre au premier objectif du mémoire, soit d'évaluer la qualité de l'estimation des niveaux d'eau à partir d'images SWOT synthétiques.

L'implication d'utiliser un réservoir aussi grand qu'Eastmain-1 entraîne qu'aucune image SWOT ne couvre entièrement celui-ci. Ce faisant, il est important de définir dans quelle mesure il est possible de compléter les images SWOT synthétiques à couverture partielle afin d'obtenir une estimation du niveau et du volume sur l'intégralité du réservoir.

Enfin, une estimation du volume d'eau contenu dans le réservoir ainsi que des apports par bilan hydrique sont calculés à partir des images SWOT synthétiques. Ces séries temporelles sont ensuite comparées avec les véritables observations provenant des stations de mesures d'Hydro-Québec. Ces analyses permettent alors de répondre au second objectif du mémoire, soit d'évaluer le gain d'utiliser des images SWOT dans l'estimation du bilan hydrique et dans la réduction du bruit généralement présent dans les apports calculés par bilan hydrique.

### **1.5.4 Chapitre 5 : Conclusion**

Le chapitre de conclusion synthétise les faits saillants rapportés entre les chapitres 2 à 4 et discute des implications sur l'utilisation du satellite SWOT pour le suivi des niveaux d'eau et l'amélioration de l'estimation des apports calculés par bilan hydrique.

## CHAPITRE 2 SUIVI DES NIVEAUX D'EAU ET DU BILAN HYDRIQUE : ÉTAT DE L'ART

Les dernières décennies ont connu plusieurs avancées qui ont permis d'accroître notre connaissance des étendues d'eau et des débits en hydrologie continentale. Ainsi, en premier lieu, une revue des principes et de l'historique dans le domaine de la télédétection ayant contribué à l'amélioration de notre connaissance de ces deux variables sera présentée. Cette revue présente l'évolution de ces produits satellitaires en hydrologie ainsi que leurs limitations. Un accent sera également mis sur le potentiel du futur radar altimétrique imageur SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*). Par la suite, il sera question d'analyser diverses méthodes d'estimation des apports dans un réservoir. Étant donné que cette variable est généralement déterminée par simple bilan hydrique, il est pertinent d'évaluer si celle-ci peut être estimée par des approches plus précises. Plus particulièrement, il sera question d'étudier diverses méthodes qui sont performantes lorsque le signal est très bruité.

### 2.1 Principes et théorie de la télédétection des plans d'eau

#### 2.1.1 Altimétrie radar

Un altimètre radar est un capteur qui émet une onde radar au nadir, puis mesure le temps de réponse du signal. L'altimétrie radar est particulièrement utilisée dans les domaines de l'océanographie et de la géodésie, notamment pour comprendre la dynamique des océans (vitesses, courants, vagues, bathymétrie océanographique, etc.). La figure 2-1 présente le principe général permettant d'estimer le niveau d'eau océanographique,  $E$ , par rapport au géoïde (aussi appelé topographie dynamique). La distance  $D$  séparant l'altimètre et la cible est déterminée grâce à la vitesse connue de l'onde. L'ondulation du géoïde  $O$  est la distance entre le niveau de l'ellipsoïde et du géoïde. En connaissant la position de l'altimètre  $A$ , il est possible de déterminer  $E$  par l'équation :  $E = A - D - O$ .

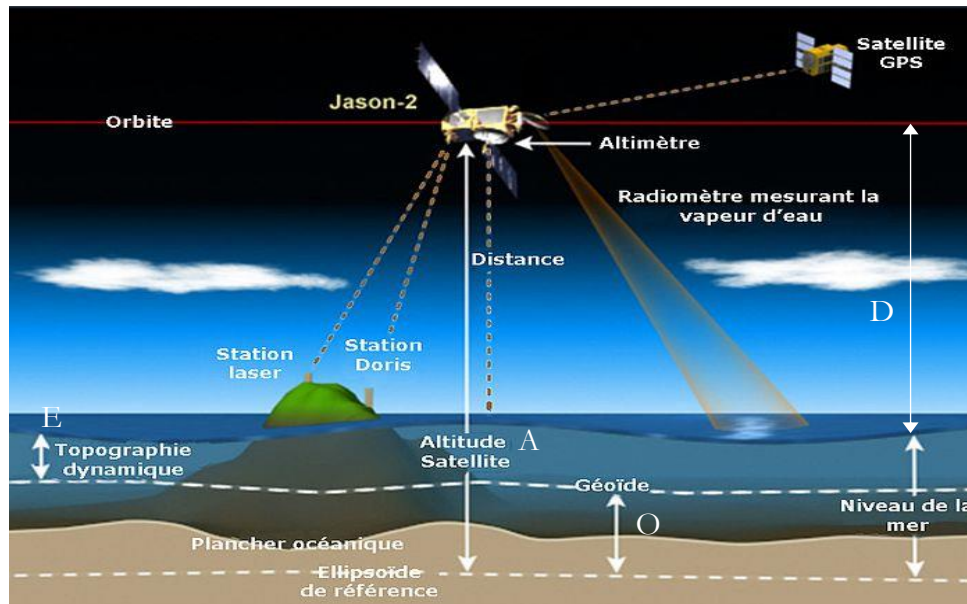


Figure 2-1 Présentation du concept d'altimétrie radar. Modifié de NASA and NOAA Altimetric and Ocean Surface Topography Data Information [2017]

Bien que le principe de l'altimétrie radar soit conceptuellement simple, il est hautement difficile à implémenter en pratique. En effet, trois sources d'incertitudes importantes doivent être tenues en compte. D'abord, la position de l'altimètre  $A$  doit être connue avec un haut degré de précision. La position des altimètres radars contemporains est déterminée à l'aide des trois systèmes d'instrumentation suivants : GPSDR (*Global Positioning System Demonstration Receiver*), DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) et des rétro réflecteurs laser. La combinaison de ces systèmes permet d'atteindre une précision radiale d'environ 2 cm.

D'autre part, l'onde est influencée par la présence de l'atmosphère et il convient donc de corriger ses effets sur le signal. Par exemple, l'onde est ralentie en raison de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Ce faisant, des radiomètres à micro-ondes passives qui peuvent mesurer le profil de l'humidité de l'atmosphère sont utilisés pour corriger le signal de l'onde, mais ceux-ci ne sont pas aussi exploitables sur les continents en raison de l'émissivité de la Terre. Le recours aux modèles est donc requis dans ces circonstances. De plus, l'influence des électrons et de la masse d'air dans l'ionosphère est prise en compte en recourant à l'altimétrie bifréquence dans les bandes C-Ku. D'autres approches, tel que le recours aux modèles météorologiques, peuvent être utilisées pour diminuer l'impact de



l'atmosphère, ou encore des modèles permettant de corriger les biais causés par les vagues [Steele et al., 2009].

Enfin, une dernière source d'incertitude est la contamination du signal par des élévations qui proviennent du sol plutôt que des plans d'eau, ce qui est particulièrement important à tenir en compte aux berges des plans d'eau ou plus généralement lorsque la variation de la topographie est importante sur la largeur de la fauchée du satellite.

### 2.1.2 Radar à synthèse d'ouverture

Le principal désavantage des altimètres conventionnels est que la résolution spatiale est proportionnelle à la taille de l'antenne  $L$ . Ce faisant, il existe donc une contrainte physique difficile à outrepasser qui limite l'atteinte de haute résolution spatiale.

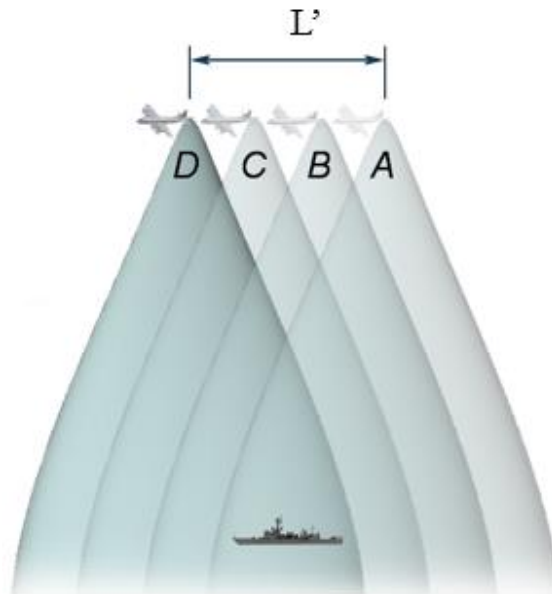


Figure 2-2 Amélioration de la résolution spatiale avec le radar à synthèse d'ouverture [Christian Wolff, 2017]

Le principe du radar à synthèse d'ouverture (RSO) consiste à utiliser de manière redondante le signal de retour d'une cible à mesure que le satellite se déplace. Par exemple, comme montrée à la figure 2-2, la cible est détectée pour la première fois lorsque le satellite est à la position A et est détectée pour la dernière fois à la position D. Ce faisant, en traitant le signal de chaque impulsion pour corriger l'effet Doppler, il en résulte une résolution accrue. Une antenne équivalente à une longueur  $L'$  est donc créée synthétiquement par le traitement complexe de multiples impulsions. Le principe général du RSO est

attribué à Wiley [1954] et a été démontré pour la première fois par Graham [1974]. En effet, Graham a démontré que le RSO pouvait améliorer la résolution spatiale vers l'azimut de 4.5 km sans RSO à environ 5 mètres en traitant de multiples impulsions par RSO.

### 2.1.3 Interférométrie radar

Tel que mentionné à la section 2.1.1, l'altimétrie radar nadir conventionnelle permet de mesurer la distance entre une cible et le satellite. Cette approche peut toutefois avoir des limitations, notamment dans les cas où la variation de topographie est importante dans la direction perpendiculaire à la trajectoire du satellite. En effet, tel que montré à la figure 2-3A, l'acquisition du signal dans une direction oblique implique que les points P et P' inclus dans une même cellule de résolution ne peuvent être distingués.

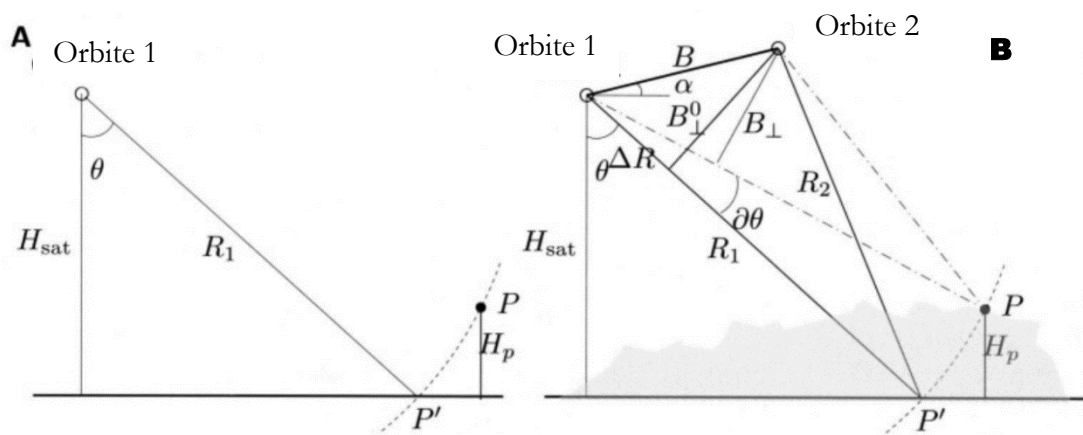


Figure 2-3 Principes de l'interférométrie radar. Modifié de Hanssen [2010]

L'interférométrie radar consiste en l'acquisition du signal d'une même cible à partir de deux capteurs. Ces capteurs peuvent être embarqués sur un même satellite. Dans cette situation, l'acquisition de deux images au même moment implique que les propriétés de rétrodiffusion de la cible peuvent être considérées constantes. L'interférométrie radar peut également provenir de la comparaison de deux images d'une même cible acquises à des moments différents. Dans ces cas, il faut s'assurer que les propriétés de rétrodiffusion soient maintenues lors de l'acquisition des deux images [Lu et al., 2007]. L'interférométrie radar permet d'estimer la variable  $\partial\theta$ , montrée à la figure 2-3B, qui peut être estimée en comparant la phase des signaux des deux images. Par des manipulations géométriques, il est alors possible de dériver la hauteur  $H_p$ .

## 2.2 L'estimation de niveaux d'eau et de débits par télédétection spatiale : revue historique

La télédétection pourrait permettre au gestionnaire de barrages d'avoir une connaissance accrue de l'état des niveaux d'eau et des apports de son réservoir. En effet, plusieurs satellites permettent de mesurer directement ou de dériver des variables hydrauliques d'intérêt. Cette section fait la synthèse des altimètres radars ayant permis d'estimer des niveaux d'eau et des débits continentaux. La figure 2-4 présente l'évolution dans le temps des missions les plus importantes en altimétrie spatiale pour l'étude des niveaux d'eau.

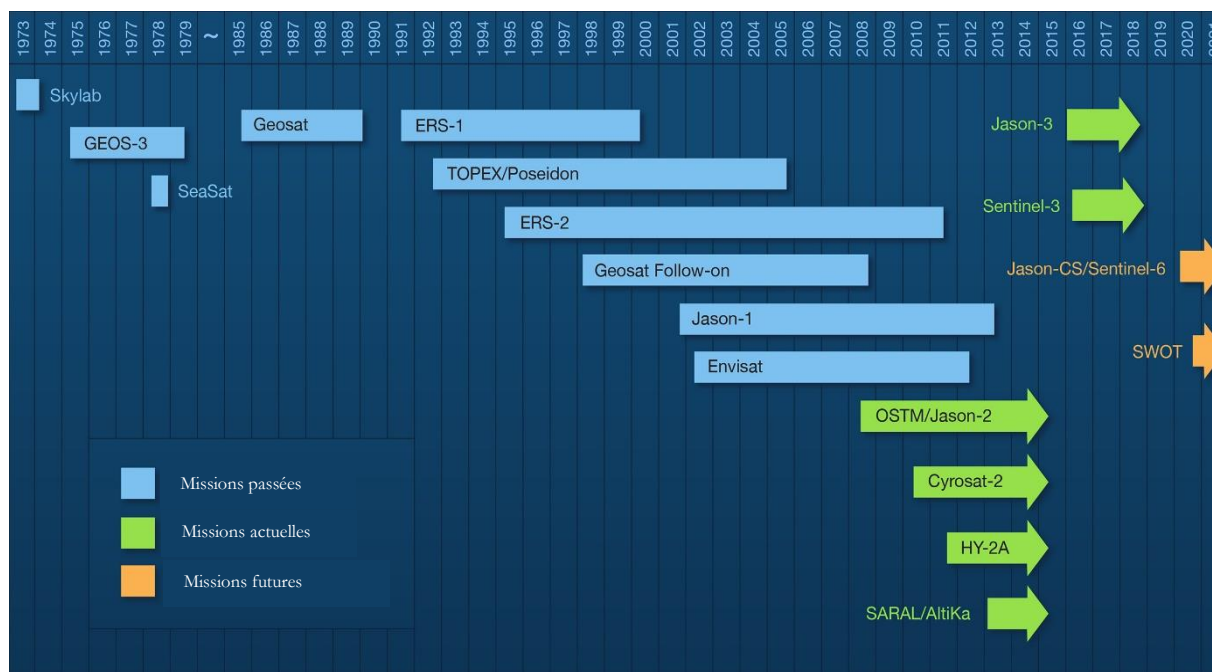


Figure 2-4 Évolution des missions les plus importantes pour l'altimétrie des niveaux d'eau. Adapté de NASA and NOAA Altimetric and Ocean Surface Topography Data Information [2017]

Le tableau 2-1 permet d'ailleurs de comparer les caractéristiques des altimètres radars les plus importants et l'évolution de leurs caractéristiques dans le temps.

Tableau 2-1 Synthèse des missions mesurant des niveaux d'eau (océaniques et/ou continentaux)

	Période	Cycle (en jours)	Surface couverte	Largeur de fauchée
<b>Geosat</b>	1985 - 1990	17	72°N – 72°S	nadir
<b>ERS-1</b>	1991 - 2000	35	82°N – 82°S	nadir
<b>Topex/Poseidon</b>	1992 - 2005	10	66°N - 66°S	nadir
<b>ERS-2</b>	1995 - 2011	35	82°N – 82°S	nadir
<b>GFO</b>	2000 - 2008	17	72°N - 72°S	nadir
<b>Jason -1</b>	2002 - 2012	10	66°N - 66°S	nadir
<b>Jason -2</b>	2008 - 2019			
<b>Jason -3</b>	2016 -			
<b>Envisat</b>	2002 - 2012	35	82°N – 82°S	nadir
<b>Sentinel -3</b>	2016 -	27	82°N – 82°S	nadir
<b>SWOT</b>	2021 (prévu)	21	78°N - 78°S	120 km
Source : [Agence spatiale européenne, 2004; Équipe Sentinel-3, 2013; Jet Propulsion Laboratory, 2001, 2008; Srinivasan, 2014]				

La section 2.1.1 décrit comment ces altimètres ont été utilisés pour le suivi des variables hydrologiques à travers le temps. Les limitations de la technologie actuelle et le potentiel de SWOT sont présentés respectivement à la section 2.1.2 et 2.1.3.

### 2.2.1 De Geosat à Jason-3 : applications pour l'hydrologie continentale

L'ensemble des altimètres ayant été déployés sur les missions allant jusqu'à Jason-3 ont eu pour objectif principal de mesurer le niveau des eaux des océans. Néanmoins, plusieurs chercheurs ont utilisé ces satellites afin de dériver des estimations de niveaux et de débits continentaux.

Les premières applications en hydrologie continentale remontent au début des années 1990, notamment avec les satellites Geosat, ERS-1 et Topex/Poseidon. Koblinsky et al. [1993] étaient parmi les premiers à reconnaître le potentiel des altimètres radar pour des applications en hydrologie continentale. Les auteurs ont utilisé les données de Geosat à quatre locations le long de l'Amazone où des jaugeages de niveaux étaient disponibles sur une période d'environ 2 ans. Les quatre jaugeages étaient répartis entre les villes de Manaus et Novo Aripuana. L'écart-type de la différence entre les niveaux estimés par Geosat et ceux jaugeés ont varié entre 0,19 m à Manaus et 1,09 m à Novo

Aripuana. Les auteurs étaient conscients à l'époque que bien que ces résultats étaient intéressants, les écarts observés étaient encore trop élevés pour la plupart des applications en hydrologie. Toutefois, ils ouvraient alors la voie à l'utilisation de l'altimétrie radar pour le suivi des niveaux avec notamment l'arrivée des satellites ERS-1 et Topex/Poseidon.

Birkett et al. [2002] ont utilisé l'altimètre TOPEX/Poseidon pour déterminer plusieurs niveaux d'eau dans les tributaires du bassin versant de l'Amazone. Ils ont sélectionné 230 points dont la largeur du cours d'eau était au moins supérieure à 500 mètres. Ils ont comparé les données collectées par TOPEX/Poseidon (T/P) et ont conclu qu'entre 30-50% des points correspondaient avec une bonne qualité aux observations (moyenne de 1.1 m entre l'écart-type des différences de T/P et des stations). Ils ont cependant confirmé que le satellite donnait de piètres résultats lorsque la largeur de la rivière est inférieure à 1 kilomètre étant donné la contamination du signal par les berges. Également, les auteurs ont noté des différences considérables de la précision d'un site à l'autre, avec l'écart-type des différences de T/P et des stations variant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres.

Le suivi des niveaux d'eau a également été tenté à partir des données de satellites dont la mission n'est pas a priori le suivi des eaux. En effet, LeFavour et Alsdorf [2005] ont été les premiers à utiliser des données du *Shuttle Radar Topography Mission* (STRM) pour calculer le niveau d'eau sur plusieurs points choisis parmi les tributaires les plus importants du bassin versant de l'Amazone. La mission STRM réalisée en 2000 avait pour objectif de générer un modèle numérique de surface de la Terre entre 60°N – 56°S. Deux capteurs radars RSO distancés de 60 mètres ont permis d'estimer par interférométrie des élévations de surface. En comparant les données des stations aux élévations de STRM, les auteurs ont obtenu un écart-type moyen de 5,51 m. Connaissant l'erreur sur la hauteur d'eau, les auteurs ont évalué qu'il faudrait un tronçon d'au moins 733 km de long afin d'estimer adéquatement la pente de la surface d'eau pour la rivière analysée. Il est pertinent de mentionner qu'à l'époque, la résolution spatiale des produits de SRTM était de 90 m par rapport à 30 m aujourd'hui. Ainsi, malgré des résultats mitigés, la technique d'interférométrie RSO utilisée par la mission STRM est pertinente et est plus tard reprise par la mission SWOT avec des capteurs différents spécifiques pour le suivi des eaux.

D'autres études ont également été réalisées avec des satellites plus récents, notamment Envisat. Toutefois, la plupart de ces études demeurent limitées à des applications sur de larges rivières ou étendues d'eau. Le Pantanal, par exemple, situé principalement au Brésil et partiellement en Bolivie et au Paraguay, est la plus grande zone humide du monde. Les données de l'altimètre radar Envisat ont été utilisées afin d'en estimer le niveau d'eau par Dettmeing et al. [2016]. En comparant avec des observations à six sites, ils ont obtenu une erreur quadratique moyenne variant de 30 à 50 cm. Ils ont été en mesure, dans certains secteurs, de bien visualiser la variation des niveaux d'eau annuels de l'ordre d'environ 1,5 m. Toutefois, dans d'autres secteurs, les données d'Envisat sous-estimaient l'amplitude annuelle des niveaux d'eau de l'ordre des décimètres, ce qui les rend invalides. De plus, la période de retour (ou cycle) d'Envisat est de 35 jours, ce qui implique moins de 12 observations satellitaires par année à un point donné.

Hwang et al. [2016] ont utilisé la famille Topex/Poseidon, Jason-1 et 2 pour mesurer les variations à long terme dans les lacs du plateau tibétain. Il est pertinent de rappeler que cette famille de satellites a des caractéristiques similaires, dont une période de retour et une couverture du globe identique. Les chercheurs ont réussi à dégager les tendances à long terme de montée ou descente des eaux. L'estimation des tendances à long terme dans des régions éloignées sans aucune mesure *in situ* permet entre autres d'anticiper le risque futur d'inondations ou d'étiages.

### **2.2.2 Limitations de la technologie actuelle**

Les altimètres nadir (ERS-2, Jason -1 et 2, Topex/Poseidon) peuvent dans certaines conditions estimer des niveaux d'eau dans les rivières et les lacs. Cependant, leur principal défaut est que la largeur de leur fauchée est relativement étroite (~5 km). Ce faisant, de nombreuses régions du globe ne sont jamais couvertes, ce qui limite les applications [Biancamaria et al., 2010]. L'autre principal défaut des altimètres appliqués à l'hydrologie est que ceux-ci ont été conçus d'abord et avant tout pour des applications océanographiques, ce qui complexifie leur utilisation pour l'hydrologie continentale. De plus, le cycle des satellites varie entre 10 à 35 jours. Ce faisant, les observations des altimètres comportent des limitations importantes pour des applications où le suivi de l'état des niveaux d'eau est requis à des pas de temps journalier ou infrajournalier.

### 2.2.3 Mission contemporaine : SWOT

En 2021, il est prévu que l'altimètre radar SWOT développé en partenariat par la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), le Centre National d'Études Spatiales (CNES), le *U.K. Space Agency* (UKSA) et l'Agence Spatiale Canadienne (ASC) soit mis en orbite. Ce satellite sera le tout premier altimètre imageur, tel que montré à la figure 2-5. Il permettra de cartographier des images de niveaux d'eau continentale à une résolution spatiale très fine d'environ 50 à 100 m à une précision verticale moyenne de 10 cm pour une superficie de 1 km<sup>2</sup> [Biancamaria et al., 2010]. Le satellite pourra également estimer la pente des plans d'eau à une précision de 1,7 cm par km. Ainsi, ce satellite possède une résolution nettement plus fine que ces prédécesseurs. SWOT pourra cartographier jusqu'à 65% des surfaces d'eau continentale à l'échelle globale [Biancamaria et al., 2010]. En effet, le satellite pourra mesurer des hauteurs d'eau pour les rivières ayant une largeur d'au moins 100 mètres (possiblement, aussi peu que 50 mètres) ainsi que pour les lacs ayant une superficie d'au moins 250 m x 250 m. Aussi, grâce à sa fauchée de 120 km (une bande centrale de 20 km n'est pas « vue » par le radar, toutefois un altimètre nadir disposé dans le satellite permettra de recueillir de l'information dans cette bande), le satellite permettra de cartographier des étendues d'eau en deux dimensions, contrairement aux altimètres conventionnels qui ont une fauchée relativement étroite.

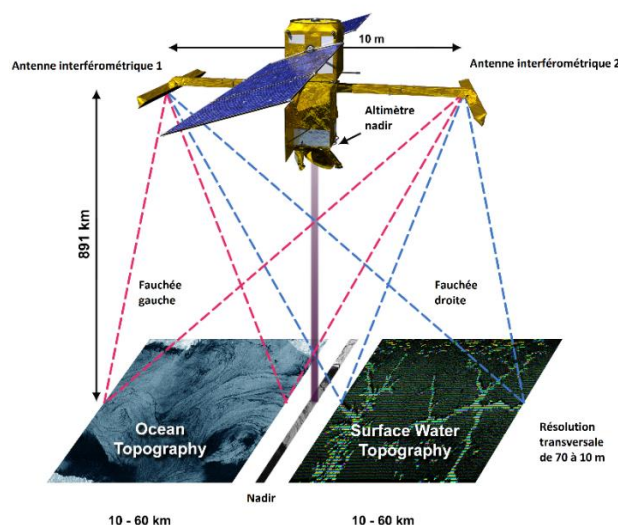


Figure 2-5 Schéma des interféromètres et de l'altimètre au nadir du satellite SWOT (Traduit de JPL/NASA, 2015)

De plus, le fait que le satellite puisse à la fois produire des cartes d'étendue d'eau, déterminer le niveau de l'eau par rapport à l'ellipsoïde et estimer la pente de l'eau de surface procure une combinaison idéale sur des paramètres hydrauliques importants. Auparavant, l'utilisation de données de télédétection pour

des applications hydrauliques impliquait qu'il fallait coupler les données de plusieurs satellites pour obtenir ces informations et la superposition des données entraînait une perte de qualité due à la variabilité temporelle et spatiale, à la représentativité et à la résolution des différents satellites. Les caractéristiques principales du satellite sont présentées au tableau 2-2.

Tableau 2-2 Paramètres de la mission scientifique SWOT [Biancamaria et al., 2010; Domeneghetti et al., 2018]

<b>Caractéristiques</b>	<b>Altitude</b>	<b>970 km</b>
	Période de retour	20,86 jours
	Inclinaison	78°
	Largeur de la fauchée	2 x 50 km
	Résolution (azimut)	5 mètres
	Résolution (portée)	60 à 10 mètres
	Gap au nadir	20 km
	Fréquence de l'onde	35.75 GHz (bande Ka)
	Interférométrie :	2 radars à synthèse d'ouverture à 10 mètres
	Altimétrie au nadir	Bande Ku et C
<b>Précision altimétrique</b>	Superficie $\geq 1 \text{ km}^2$	$\leq 10 \text{ cm}$
	$(250 \text{ m})^2 \leq \text{Superficie} \leq 1 \text{ km}^2$	$\leq 27 \text{ cm}$
<b>Erreur relative sur les étendues d'eau</b>	Rivière de largeur $\geq 50 \text{ m}$	$\leq 25\%$
	Rivière de largeur $\geq 100 \text{ m}$	$\leq 15\%$
<b>Précision de la pente</b>	Rivière de 10 km et de largeur $\geq 100 \text{ m}$	1,7 cm/km

Le satellite a une durée de vie minimale prévue de 3 ans. Il y a également 3 mois de prévus au début de la mission pour la calibration du satellite de même que 3 mois supplémentaires à un cycle d'orbite rapide. Enfin, un cycle de passage final de 21 jours sera maintenu jusqu'à la fin de la mission.



Un élément essentiel de la mission SWOT est la vaste communauté de scientifiques qui développent actuellement des produits qui seront éventuellement accessibles. Ces produits sont notamment une base de données de lacs et rivières à l'échelle du globe de type vectoriel et matriciel [Allen et Pavelsky, 2018; Sheng et al., 2016]. Pour chaque rivière et lac disponibles dans cette base de données, il est prévu que les variables, telles que le niveau de l'eau, soient mises à jour à chaque passage de SWOT, ce qui permettra de constituer des séries temporelles. Les produits RiverObs et LOCNES (*Lake Observation Cover and Extent from SWOT*) sont actuellement développés par le JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) et le CNES pour créer les produits vectoriels des rivières et des lacs, respectivement. Ces produits étant encore en développement, des cas d'applications ont été expérimentés, notamment avec RiverObs. En effet, Durand et al. [2018] ont présenté le cas de la rivière Sacramento en Californie, à la hauteur de la ville de Hamilton City sur une distance d'environ 45 km. Ils ont d'abord modélisé le tronçon de rivière à l'aide du modèle hydraulique HEC-RAS et ont produit des images SWOT synthétiques représentant divers passages du satellite sur divers segments de la rivière. À l'aide de RiverObs, ils ont modélisé une erreur quadratique moyenne de 4,3 mètres pour l'estimation de la largeur de la rivière par rapport à une modélisation HEC-RAS, de 38 cm pour le niveau de l'eau et de 1,05 cm/km pour l'estimation de la pente.

Un travail exhaustif de synthèse a été réalisé par Biancamaria et al. (2016) pour la mission SWOT ainsi qu'une multitude de publications sur son potentiel en hydrologie. Il existe ainsi trois applications qui sont le plus étudiées, à savoir : l'estimation des débits en rivière avec SWOT, son utilisation dans un contexte d'estimation de niveaux d'eau de rivières, lacs ou réservoirs ainsi que son utilisation pour assimiler des données dans un modèle hydrodynamique. Puisque les techniques d'estimation des débits en rivière ne constituent pas l'objectif de ce mémoire, le lecteur intéressé est référé à la synthèse réalisée par Biancamaria et al. [2016].

Quelques exemples d'utilisation de SWOT pour des applications en lacs et réservoirs sont présentés ci-dessous. L'utilisation de SWOT dans un contexte d'assimilation de données fait l'objet de la section 2.4.2.

En 2010, Lee et al. ont tenté d'évaluer la précision du satellite SWOT pour évaluer la variation du volume d'eau dans les lacs du Peace-Athabasca Delta (PAD). Comme ce domaine est faiblement jaugé, les auteurs ont constitué un jeu de données de niveaux « vérité » sur lequel ils ont appliqué du bruit afin de reproduire les incertitudes attendues de la mission SWOT. Ceux-ci ont fait varier l'inclinaison des orbites de même que le nombre de revisites lors d'un cycle de passage du satellite. Ils ont déterminé que l'erreur relative d'estimation de la variation de volume d'eau pour les lacs de plus de 1 km<sup>2</sup> était généralement plus faible que 5% alors que pour des petits lacs (environ 1 ha de superficie), l'erreur relative était d'environ 20%. Les auteurs mentionnent également que l'inclinaison et le nombre de revisites lors d'un cycle n'ont que peu d'impacts sur la qualité de l'estimation, mais que la forme du lac en impacte la qualité. Ce constat a également été rapporté par Grippa et al. [2019].

Yoon et al. [2016] ont tenté d'évaluer s'ils étaient en mesure d'effectuer un suivi continu (journalier) du niveau de l'eau d'un réservoir non jaugé ainsi que son débit sortant avec les données fournies par SWOT à chaque passage. Ceux-ci ont donc créé des images SWOT synthétiques, basées sur les caractéristiques de la mission, pour 8 petits réservoirs appartenant au système hydrique de la rivière Cumberland aux États-Unis. De celles-ci, ils ont évalué une série temporelle d'élévation moyenne de l'eau pour chaque réservoir, à partir desquels ils ont estimé un volume d'eau pour chaque passage SWOT (3-4 fois par cycle de 21 jours). Le repassage peu fréquent de SWOT empêche de percevoir des événements de crues rapides et pose une limitation à l'approche. Ainsi, les auteurs ont créé un algorithme basé sur l'équation de continuité et le filtre de Kalman d'ensemble dont l'objectif est de mieux simuler le niveau d'eau entre les passages de SWOT. L'algorithme offre une erreur moyenne quadratique normalisée de 9 % par rapport à la vraie estimation de volume d'eau. Plus encore, Yoon et al. [2016] ont utilisé le modèle Hillslope River Routing afin de tenir compte du laminage dans le système hydrique. Ceux-ci observent alors une amélioration de 64% du débit sortant par rapport à ne pas inclure l'effet de laminage, ce qui implique une erreur moyenne quadratique normalisée de 28% en moyenne sur les 8 réservoirs pour l'estimation du débit sortant par rapport aux observations.

Également, Grippa et al. [2019] ont étudié la capacité de SWOT à estimer le niveau de l'eau dans les lacs et étangs de la région du Sahel. Plus spécifiquement, l'étude s'est penchée sur les lacs Zalam-Zalam et Agoufou. Ces lacs ont une superficie similaire qui varient d'environ 100 ha entre la saison

sèche et humide. La distinction majeure entre les deux lacs émane de leurs formes respectives : élongée pour le lac Zalam-Zalam et circulaire pour le lac Agoufou. Les auteurs ont d'abord constitué un modèle numérique d'élévation comprenant la bathymétrie de la région à l'aide de données de la mission SRTM [Farr et al., 2007], de données satellitaires optiques ainsi que des données de mesures *in situ*. Les données de niveau ont été fournies par l'observatoire AMMA-CATCH. Ces données ont constitué les intrants au simulateur SWOT-HR, ce qui a permis de générer des pixels de niveaux d'eau avec l'incertitude attendue de SWOT. Ces images ont été comparées avec les données *in situ*. Les auteurs obtiennent une erreur quadratique moyenne maximale d'environ 4 cm sur l'estimation du niveau d'eau au lac Agoufou, alors que pour le lac Zalam-Zalam, cette erreur varie de 6,3 cm au passage 003 comparativement à 15,1 cm au passage 100. Les auteurs rappellent également l'importance de la forme du réservoir et l'angle d'incidence de SWOT sur la performance variable de l'estimation des niveaux d'eau d'un site à l'autre ou sur un même réservoir à des passages différents.

Bonnema et Hossain [2019] ont utilisé le simulateur SWOT-HR afin d'évaluer l'erreur relative de la variation de volume d'eau pour 20 réservoirs situés à l'intérieur du bassin versant de la rivière Mekong. Ils ont évalué que cette erreur était généralement inférieure à 8%. Toutefois, les auteurs ont remarqué des erreurs plus importantes dans 3 des 20 réservoirs. Celles-ci ont été attribuées à une topographie complexe entourant les réservoirs ou encore à leur forme élongée.

Par ailleurs, deux simulateurs SWOT sont actuellement disponibles pour des applications de recherche, soit SWOT-HR et SWOT-LS, le simulateur à large échelle développé par le CNES. Ceux-ci permettent de générer un nuage de points (*pixel cloud*) de niveaux de surface (eau et terre) équivalents aux produits de niveau 2 du satellite (L2), lequel est considéré comme un produit « brut » (Des produits dérivés ayant subi un post-traitement plus fin seront accessibles pour une utilisation par la communauté hydrologique). Ces simulateurs SWOT seront décrits et approfondis au chapitre 4.

## 2.3 Estimation du bilan hydrique

L'estimation des apports aux réservoirs provient généralement de l'application du bilan hydrique tel que montré à l'équation 2-1 :

$$I_i = \frac{V_{i+1}(z) - V_i(z)}{\Delta t} + R_i \quad (2-1)$$

Où  $I_i$  est le débit entrant (apport) agrégé au pas de temps  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $R_i$  est le débit sortant agrégé au pas de temps  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $V$  ( $\text{m}^3$ ) est le volume stocké dans le réservoir, lequel dépend de l'élévation  $Z$  (m) de celui-ci et  $\Delta t$  représente la variation de temps entre les pas de temps  $i$  et  $i+1$ .

Tel qu'expliqué à la section 1.2, les apports estimés sont typiquement fort bruités et des valeurs négatives peuvent même être calculées. Une amélioration de l'estimation des volumes d'eau dans les réservoirs et les lacs devrait améliorer l'estimation des débits reconstitués. La présente section réalise une revue non exhaustive de méthodologies autres que l'évaluation des niveaux d'eau par télédétection qui permettrait d'améliorer l'estimation du bilan hydrique ou à tout le moins, des variables de l'équation 2-1. Plus spécifiquement, des méthodes de filtrage des apports sont présentées de même que des approches par télédétection pour estimer des relations entre les niveaux d'eau et l'emmagasinement d'un lac ou réservoir.

Dans leur étude sur le réservoir Danjiangkou en Chine, qui draine une superficie de  $95\,200\text{ km}^2$  et dont le débit moyen horaire est de  $3027\text{ m}^3/\text{s}$ , Deng et al. [2015b] ont tenté de dériver une équation paramétrée qui tient compte de la continuité pour évaluer le bilan hydrique. L'idée est la suivante : la continuité est importante pour les variables de niveaux d'eau et de débit entrant au réservoir, c'est-à-dire que les variables d'état ne devraient pas changer énormément pour de faibles pas de temps dans un contexte de réservoir. Cette réalité contraste avec les données généralement collectées dont le bruit peut être très important (montré à la figure 1-1b). Ainsi, Deng et al. [2015b] ont proposé une équation paramétrée par  $\alpha$  tel que présenté à l'équation 2-1 :

$$\min \alpha \sum_{i=1}^{n-1} (2V_{i+1} - V_i - V_{i+2} + R_i - R_{i+1})^2 + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^{n+1} (V_i - V_i^0)^2 \quad (2-2)$$

Où  $V_i$  correspond à une nouvelle estimation du volume de l'eau ( $m^3$ ) à évaluer et  $V_i^0$  est l'observation du volume au temps  $i$  ( $m^3$ ). Le premier terme de l'équation correspond aux variations de débits entrants alors que le second terme correspond à la différence entre le volume estimé et celui observé. La minimisation de l'équation 2-2 permet de déterminer un nouvel ensemble de volumes qui peuvent ensuite être utilisés dans l'équation du bilan hydrique (2-1). Cette équation pénalise la non-continuité dans la série de volumes estimés, ce qui a pour effet de lisser la série temporelle de volume final. Le paramètre  $\alpha$  peut être ajusté pour modifier l'estimation du volume et peut être ajusté au cas par cas d'un réservoir à l'autre. Celle-ci est ainsi plus lisse et plus robuste qu'en utilisant une simple moyenne mobile. Pour évaluer la performance de leur modèle, Deng et al. [2015] ont généré un bilan hydrique synthétique et ont évalué la performance de leur approche par rapport à une moyenne mobile. L'erreur quadratique moyenne commise (en lame d'eau ( $m$ )) est de 0,02 mètre pour leur méthode par rapport à 0,05 mètre pour la moyenne mobile. Cette amélioration est significative étant donné la simplicité de mise en œuvre de la méthode.

Étant donné l'importance de l'évaluation du volume d'eau dans le bilan hydrique, plusieurs études ont tenté d'évaluer la bathymétrie d'un réservoir, laquelle est souvent inconnue ou désuète pour un réservoir étant donné les ressources requises pour en faire l'évaluation. Ran et Lu [2012] ont tenté d'identifier dans quelle mesure l'imagerie satellitaire permettrait d'évaluer le stockage d'eau dans le bassin versant du fleuve Jaune en Chine. À l'aide de l'imagerie Landsat et de composés colorés dans les bandes 7, 4 et 3, ceux-ci ont calculé un total de 2816 réservoirs, soit environ 89,5 % de ce qui est officiellement rapporté par les autorités. Ils ont évalué la superficie des réservoirs à 238,65  $km^2$  et ont ensuite utilisé des équations empiriques afin de convertir la superficie en volume. Ils ont déterminé le volume de stockage pour l'ensemble des réservoirs dont la taille est supérieure à la résolution spatiale de Landsat de 30 mètres. Ils ont ensuite évalué le volume de stockage total à environ 66,7  $km^3$ , soit environ 92,7% de ce qui est rapporté par les autorités.

Il est parfois important d'avoir une estimation plus raffinée des volumes de réservoir. Peng et al. [2006] ont également utilisé des images Landsat, mais cette fois sur un seul réservoir, soit le réservoir Fengman en Chine. À partir de 40 images Landsat de 1977 à 2000, ceux-ci ont évalué une délimitation de la superficie du réservoir à l'aide du NDWI (*Normalized Difference Water Index*). Les images tirées de

la base de données du *China Remote Sensing Satellite Ground Receiving Station* associe les images à une élévation. Les erreurs de cette base de données relativement à leurs mesures *in situ* sont évaluées entre 0 et 0,08 m selon l'image. En différenciant chacune des superficies avec leurs altitudes respectives, ils ont été en mesure d'estimer la bathymétrie de la réserve utile du réservoir. Les auteurs ont mentionné une performance similaire entre l'estimation par télédétection vis-à-vis l'approche conventionnelle d'arpentage au site. Ceux-ci maintiennent que l'approche par télédétection est rapide et peut donc être appliquée à répétition pour tenter de suivre l'évolution de la bathymétrie dans le temps. En effet, dans la pratique, il n'est pas rare que les courbes de relation niveau-emmagasinement ne soient pas mises à jour régulièrement étant donné les coûts engendrés par une telle initiative.

Dans l'étude de Bonnema et Hossain [2019], il a également été tenté de définir des relations niveau-emmagasinement à partir d'images SWOT synthétiques. Ils ont déterminé qu'après environ 1 an d'acquisition d'images SWOT, suffisamment de points de données avaient été collectés afin de définir une courbe niveau-emmagasinement pour la réserve utile d'un réservoir. Au total, la courbe calculée à partir des images SWOT synthétiques a été comparée aux courbes de référence de 17 réservoirs. L'écart relatif moyen entre les volumes pour une élévation donnée a été calculé pour chacun des réservoirs, ce qui a mené à des erreurs comprises entre 1,42 % et 17,34 % (moyenne de 6,9 %) pour l'ensemble des 17 réservoirs.

L'étude du suivi des volumes d'eau des lacs et réservoirs dans le monde bénéficiera également de l'apport des données de SWOT. Biancamaria et al. [2010] ont tenté de déterminer le volume d'eau qui varie dans les lacs à l'échelle du globe et la proportion qui pourra être quantifiée grâce à SWOT par rapport aux possibilités actuelles. Inspiré de Downing et al. [2006], une relation inversement proportionnelle a été définie entre le nombre de lacs dans sur la Terre par rapport à leur taille respective. En utilisant des données de niveaux d'eau du *USGS (United States Geological Survey)* et du *WLD (World Lake Database)*, une fonction de densité cumulative (FDC) a été définie où la variable aléatoire est l'amplitude des variations de niveaux d'eau. En supposant une géométrie cylindrique pour les lacs, il a été possible d'utiliser la méthode de Monte Carlo et la FDC afin d'évaluer la quantité globale de variation de volume d'eau des lacs et réservoirs sur la Terre, laquelle est estimée à 9000 km<sup>3</sup>. Étant donné la résolution spatiale attendue de SWOT pour des lacs de superficie supérieure à 250 m

x 250 m, il est attendu que SWOT puisse faire le suivi de plus de 68% de la variation d'eau des lacs et réservoirs comparativement à 15% avec la technologie actuelle.

## **2.4 Utilisation de l'assimilation de données dans un modèle hydrodynamique**

### **2.4.1 Utilisation de l'assimilation de données en hydrodynamique**

De plus en plus, les données provenant de satellites sont couplées à des modèles par la technique mathématique de l'assimilation de données. Plutôt que d'insérer directement des données satellitaires comme intrant dans un modèle, cette technique consiste à pondérer les données satellitaires à celles déterminées par un modèle hydrodynamique, et ce, en considérant respectivement l'incertitude associée à chacune des données. Ce faisant, il est possible de « mettre à jour » l'état de certaines variables d'un modèle pour maximiser la probabilité d'estimer adéquatement les variables d'intérêt du système, par exemple les niveaux d'eau et les débits. La méthode de l'assimilation des données a notamment été utilisée avec succès dans le domaine de la météorologie et en océanographie [Liu et al., 2012]. Ses champs d'applications sont plus récents en hydrologie et en hydraulique.

L'assimilation de données à un modèle hydrodynamique a déjà été étudiée pour des applications spécifiques. Baracchini et al. [2019] ont utilisé des données *in situ* et satellitaires pour assimiler à un modèle hydrodynamique 3D du lac Genève des données de température en utilisant un filtre de Kalman d'ensemble. Le lac possède un volume estimé à 89 km<sup>3</sup> et a été modélisé à partir du modèle Delft3D-FLOW à un pas de temps de 2 secondes pour maintenir la stabilité du modèle. Le modèle a été initialisé avec un profil de température provenant de données de température *in situ* mesurée en profondeur dans le lac au mois de janvier. Les auteurs ont estimé que la correction apportée par l'assimilation de données réduisait l'erreur de température d'environ 54 %. Toutefois, pour les applications en réservoir, ils suggèrent de s'assurer de la robustesse des paramètres numériques du modèle. En effet, ils mentionnent que le risque de causer des instabilités à la suite de l'assimilation de données est important si la modélisation n'est pas robuste. Le modèle est également configuré pour avoir des sollicitations de vent et de pression atmosphérique, ce qui justifie l'utilisation d'un modèle à 3 dimensions. Par ailleurs, ils ont déterminé que pour leur application, un ensemble de 20 membres

était suffisant pour avoir une représentation adéquate des matrices de covariances du filtre de Kalman d'ensemble.

Zaoui et al. [2018] ont présenté une approche pour utiliser le filtre de Kalman d'ensemble afin de corriger les niveaux d'eau dans un modèle hydrodynamique 1D et 2D dans l'objectif d'estimer les paramètres de frottement du modèle. L'attrait de cette approche est de pouvoir ajuster les paramètres du modèle dynamiquement à mesure que des observations sont disponibles, ce qui est particulièrement important pour des modèles opérationnels dont les paramètres de calage ne font pas nécessairement l'objet d'une révision périodique.

Giustarini et al. [2011] ont amélioré significativement l'estimation de niveaux d'eau en rivière en utilisant des données radar à synthèse d'ouverture (RSO) et LiDAR (*Light Detection and Ranging*) assimilées à un modèle hydrodynamique. Neal et al. [2009] ont assimilé des mesures de niveaux d'eau estimée à partir d'imagerie RSO d'Envisat par un filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) au modèle hydraulique HEC-RAS pour la rivière Alzette au Luxembourg. La mise à jour du vecteur d'état (niveau de l'eau) dans le modèle HEC-RAS a permis de réduire l'écart-type de l'ensemble de débit simulé par HEC-RAS de près de 79 % par rapport à la modélisation sans assimilation de données.

Des études sur l'assimilation de données synthétiques SWOT dans un modèle hydrodynamique afin d'en améliorer la performance sont présentées dans la section 2.4.2.

## **2.4.2 SWOT: Expérience de simulation de système d'observation**

Yamazaki et al. [2011] suggèrent que les modèles hydrodynamiques actuels sont limités dans leurs capacités à bien modéliser la dynamique des plaines inondables. En effet, les auteurs argumentent que le maillage des modèles hydrodynamiques est souvent trop grossier pour capturer précisément l'impact de la topographie. Les auteurs proposent donc de compléter la modélisation à l'aide de données comme SWOT afin d'améliorer le suivi des niveaux d'eau, notamment par un processus d'assimilation de données.

L'assimilation des données satellitaires dans un modèle hydrodynamique a fait l'objet de plusieurs études [Baracchini et al., 2019; Biancamaria et al., 2011; Munier et al., 2015; Yamazaki et al., 2011;



Yoon et al., 2012a] afin de démontrer la plus-value du satellite pour estimer l'état d'un système. Or, il arrive souvent que pour évaluer le potentiel d'un satellite pour une application particulière, des expérimentations soient effectuées en mode synthétique avant même le lancement de celui-ci. Il s'agit d'une pratique courante en télédétection, puisque cela permet que les retombées de ces recherches contribuent au succès de la mission et que des produits soient dérivés le plus rapidement possible pour diverses applications. L'assimilation de données satellitaires synthétiques dans un modèle pour en évaluer l'impact se nomme « Expérience de simulation de système d'observation » (ESSO), (*Observation System Simulation Experiment*). La figure 2-6, inspirée de Pedinotti [2013], présente cette approche.

L'approche consiste essentiellement à constituer un modèle de rivière (hydrologique ou hydrodynamique), lequel constitue la « vérité » des variables d'états. Ce modèle est ensuite utilisé pour constituer une série d'images SWOT ayant les mêmes propriétés que celles attendues du satellite (résolution, précision, période de retour, etc.). Les intrants du modèle sont ensuite bruités pour tenir compte de l'incertitude de la modélisation hydrodynamique. Ce modèle incertain est ensuite assimilé par des images SWOT synthétiques et le gain potentiel est évalué par rapport au modèle « vérité ». Les simulateurs SWOT-HR (JPL) et SWOT-LS (CNES) seront présentés au chapitre 4 et réalisent les étapes encadrées dans la figure 2-6 de la page suivante.

Comme le lancement du satellite est prévu pour 2021, les études actuelles sont réalisées à l'aide de données synthétiques du satellite. Dans le cas de SWOT, Biancamaria et al. [2011] ont été parmi les premiers à utiliser cette méthode afin d'évaluer la plus-value du satellite pour estimer les niveaux d'eau en rivière. Ils ont modélisé la partie inférieure du fleuve Ob en Russie à l'amont de son estuaire lors de l'année 1993. Ceux-ci ont couplé le modèle hydrologique ISBA avec le modèle hydraulique 1D LISFLOOD-FP pour modéliser la rivière et l'état généré a été considéré comme « vérité ». Ils ont ensuite généré des images SWOT en rajoutant un bruit dont l'écart-type est de 2 cm (erreur due à l'instrument). Une modélisation utilisant 20 membres a été réalisée en bruitant les intrants de précipitation et de température de l'air. L'erreur quadratique moyenne spatialisée de la moyenne de l'ensemble sans assimilation est évaluée à 0,90 mètre comparativement à 0,39 mètre pour le filtre de Kalman d'ensemble et 0,33 mètre pour le filtre de Kalman d'ensemble local. Les auteurs mentionnent également que les erreurs causées par le modèle sont plus importantes que celles causées par les images

SWOT. Ce faisant, l'assimilation de ces images est considérée comme prometteuse, particulièrement avec l'utilisation du filtre de Kalman d'ensemble local.

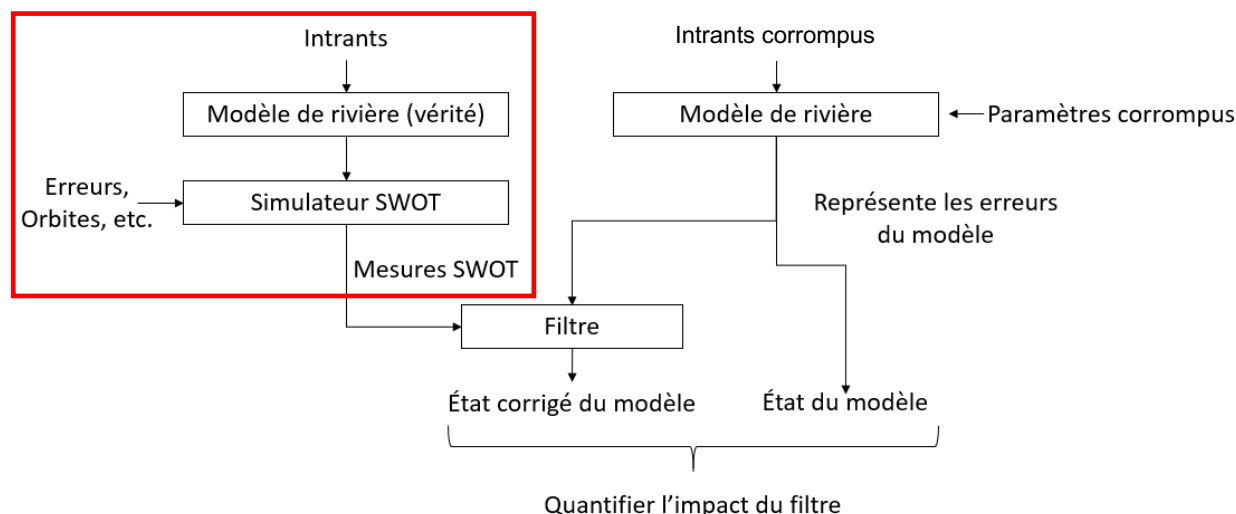


Figure 2-6 Schéma explicatif de la méthode « Expérience de simulation de système d'observation ». Traduit de Pedinotti [2013]. L'encadré de couleur rouge montre les étapes réalisées par un simulateur d'images SWOT

Pedinotti et al. [2014] ont repris la méthodologie en l'appliquant sur le bassin versant du fleuve Niger. Ces derniers ont utilisé les images synthétiques SWOT afin de caler le paramètre de frottement du modèle ISBA-TRIP. Dans ce contexte, il est considéré que le paramètre de frottement est le seul paramètre incertain du modèle. En utilisant ESSO, Pedinotti et al. [2014] ont assimilé les images synthétiques SWOT au modèle, ce qui a résulté en une baisse moyenne de 40% du coefficient de rugosité de Manning. Ceci a permis de réduire l'erreur de l'estimation des niveaux d'eau dans le fleuve Niger de 30% et dans une moindre mesure, une diminution de 7% de l'estimation du débit. Les auteurs rappellent toutefois qu'ESSO suppose des conditions idéales sur l'estimation de l'erreur du modèle et des images SWOT, hypothèses qui pourraient ne pas être rencontrées dans des conditions réelles.

Yoon et al. [2012b] ont trouvé une application intéressante à l'assimilation de données SWOT pour tenter d'estimer des variables physiques d'intérêt de la rivière tel que la bathymétrie ainsi que le cas plus typique des niveaux d'eau. Le modèle LISFLOOD-LP a été utilisé pour modéliser 6 tributaires de la rivière Ohio. Des images SWOT synthétiques ont été créées en supposant une erreur gaussienne

évaluée à 0,5 mètre. L'algorithme du filtre de Kalman d'ensemble a tout d'abord été introduit, mais un filtre local a finalement été utilisé (*local ensemble batch smoother*). L'application de l'ESSO a permis d'assimiler 8 cycles de SWOT et l'erreur moyenne quadratique dans l'estimation de la bathymétrie (profondeur du lit mineur) a été réduite par presque 3 fois pour l'ensemble des tributaires.

Häfliger et al. [2019] ont utilisé l'ESSO avec des images de SWOT synthétiques qu'ils ont assimilé à un modèle hydrométéorologique régional du bassin versant de la Garonne, en France. La modélisation du bassin a été réalisée avec le modèle ISBA/MODCOU et les sorties de modèle, couplées avec la connaissance de la mission SWOT, ont permis de générer des images SWOT. Pour une période de 1995-2000, les données SWOT synthétiques ont été assimilées au modèle afin d'améliorer la variable de coefficient de frottement du lit de la rivière. Les intrants au modèle ont été perturbés en appliquant un bruit de  $\pm 10\%$  sur le signal et l'état initial des paramètres de frottement a été bruité à l'aide d'une distribution gaussienne avec une erreur de  $5 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  pour un de leur scénario d'analyse. Finalement, l'assimilation de données a permis d'améliorer l'estimation du paramètre de frottement de Strickler avec une erreur quadratique moyenne de  $1 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  par rapport à la « vérité », ce qui a eu un impact positif sur l'estimation des niveaux d'eau.

La plupart des études sur SWOT ont été réalisées sur des rivières (Ohio, Niger, Amazonie, etc.) Or, l'utilisation de SWOT pour la gestion des réservoirs et l'estimation des débits d'apports au réservoir a comparativement été moins explorée. De plus, l'assimilation simultanée des données SWOT avec des stations de mesure, voire avec d'autres satellites (par exemple, Sentinel-3), mérite d'être explorée [Liu et al., 2012]. Un exemple d'application de l'assimilation de données en réservoir a été exploré par Munier et al. [2015], qui ont tenté d'évaluer l'impact de l'assimilation de données SWOT dans un contexte opérationnel de gestion de réservoir. Ils ont ainsi modélisé le réservoir Selingue à l'amont du fleuve Niger couplé à un algorithme d'opérations automatiques au réservoir dont l'objectif était d'assurer un débit minimum en étiage. Ils ont déterminé que l'entrée des données SWOT dans leur algorithme améliorait les décisions pour répondre aux besoins en eau à l'aval du fleuve.

# CHAPITRE 3 MODÉLISATION

## HYDRODYNAMIQUE 2D ET 3D DU RÉSERVOIR EASTMAIN-1

Le présent chapitre présente la stratégie de modélisation hydrodynamique du réservoir Eastmain-1 à l'aide du modèle TELEMAC. La section 3.1 caractérise d'abord le domaine d'étude et décrit l'ensemble des données ayant été collectées. Les concepts théoriques ainsi que pratiques du modèle TELEMAC sont ensuite expliqués à la section 3.2. La mise en œuvre du modèle d'Eastmain-1 est ensuite décrite à la section 3.3. Enfin, une analyse de sensibilité du coefficient de frottement ainsi que l'impact du vent et des types de conditions aux limites imposées au modèle font l'objet de la section 3.4.

### 3.1 Caractérisation du domaine d'étude

#### 3.1.1 Contexte

Le système hydrique de La Grande est alimenté par deux rivières principales : la Grande Rivière ainsi que la dérivation de la rivière Rupert. En tout, le bassin versant draine une superficie d'environ 206 167 km<sup>2</sup> et contribue significativement à la production d'électricité d'Hydro-Québec [Daynou, 2016]. Au total, 12 sous-bassins font partie du système hydrique, au nombre desquels 6 proviennent de la dérivation de la rivière Rupert. La grande taille des réservoirs est une caractéristique de ce système et implique donc qu'il peut être difficile de jauger adéquatement leurs niveaux de manière à bien représenter leur taille. Dans ce contexte, la détermination des débits d'apports intermédiaires par bilan hydrique est souvent très bruitée.

Le choix de modéliser le réservoir Eastmain-1 émane d'une part de l'importance que revêt le système hydrique de La Grande pour Hydro-Québec. D'autre part, le réservoir contient plusieurs séries de mesures de niveaux et des débits de bonne qualité. Ainsi, pour des applications de recherche, il est possible de tirer profit de la multitude des séries d'observations disponibles pour alimenter et valider

les modèles qui seront développés à travers ce mémoire. La figure 3-1 présente la délimitation du bassin versant d'Eastmain-1 et le système hydrique de La Grande.

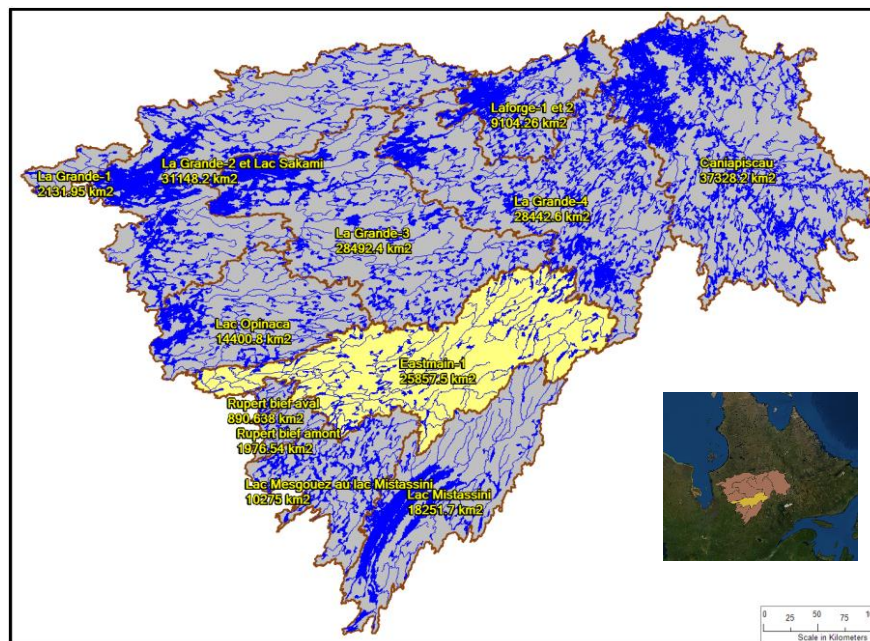


Figure 3-1 Délimitation du bassin versant d'Eastmain-1 et le système hydrique de La Grande © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission

Le bassin versant d'Eastmain-1 draine une superficie estimée à 25 857 km<sup>2</sup>. Celui-ci se déverse dans le réservoir du même nom (Eastmain-1) dont la capacité d'emménagement est d'environ 4210 hm<sup>3</sup> [Daynou, 2016]. Le principal tributaire du bassin versant est la rivière Eastmain. Depuis 2009, une dérivation partielle de la rivière Rupert au sud de la rivière Eastmain a permis d'augmenter le débit au réservoir. Cette dérivation est représentée à la figure 3-1 par les bassins versants : Rupert bief amont et Rupert bief aval lesquels sont reliés par le tunnel HQP (Tommy-Neeposh). Le volume d'eau stocké se déverse à l'amont vers le lac Opinaca, dont le bassin versant est présenté à la figure 3-1, à travers l'évacuateur de crues Eastmain-1 et deux centrales : Eastmain-1 et Eastmain-1A. L'évacuateur et les deux centrales sont représentés par le point nommé Réservoir EM-1 à la figure 3-2.

### 3.1.2 Données disponibles

Hydro-Québec collecte de nombreuses variables hydrométriques et météorologiques dans la région de la Baie James, lesquelles ont été gracieusement partagées pour la réalisation de ce travail. D'autres données telles que l'occupation du territoire ont été collectées auprès d'organismes publics.

#### 3.1.2.1 Débits et niveaux

La figure 3-2 présente l'ensemble des stations hydrométriques disponibles sur le bassin versant d'Eastmain-1 ainsi que sur le canal de dérivation Rupert.

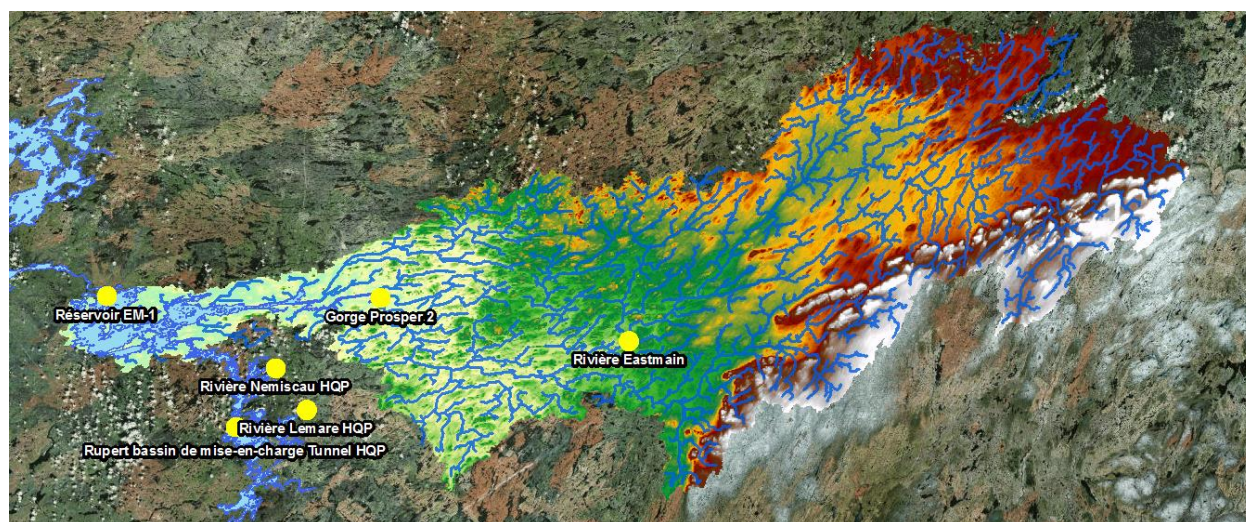


Figure 3-2 Positionnement des stations hydrométriques d'Hydro-Québec sur le bassin versant d'Eastmain-1 et le canal de dérivation Rupert © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission

Le tableau 3-1 présente pour l'ensemble de ces stations le débit ou niveau moyen annuel, le cas échéant. L'hydrogramme moyen est présenté pour l'ensemble des stations ayant un débit disponible à la figure 3-3, à l'exception de la Rivière Némiscau et du Ruisseau Arques dont les débits sont négligeables. De plus, les stations George-Prosper 2 et Rivière Eastmain, qui sont utilisées pour estimer une part de l'apport du bassin versant, ont été omises et remplacées par l'estimation des apports réalisée par Hydro-Québec. En effet, ces stations surestiment les apports, particulièrement en période hivernale lorsqu'il y a présence de glace. Il est à noter que les apports intermédiaires d'Eastmain-1 montré à la figure 3-3 ont fait l'objet d'un filtrage qui s'apparente à la méthodologie de Deng et al. [2015b] présenté à la section 2.3. Le filtre véritablement utilisé est la propriété d'Hydro-Québec et n'est donc pas présenté.



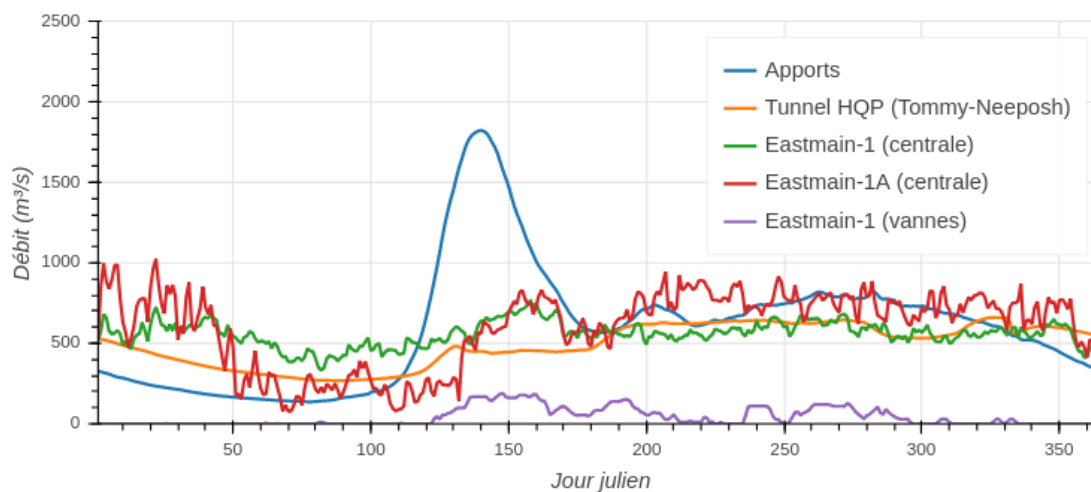


Figure 3-3 Débit moyen pour la période de 2006 à 2016. © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission

Tableau 3-1 Caractéristiques des stations disponibles pour la modélisation hydrodynamique de Eastmain-1

Nom de la station	Années disponibles	Débit moyen annuel de 2015 (m³/s) (2015)	Niveau disponible
<b>EM-1</b>	2006 – 2016		
- <i>Eastmain-1A (centrale)</i>		740	Oui/influencé
- <i>Eastmain-1 (centrale)</i>		540	Oui/influencé
- <i>Eastmain-1 (vannes)</i>		0	Oui/influencé
- <i>RESEAST.MSAT</i>	2015 – 2016	N.A.	Oui
<b>Apports</b>	2011- 2016	714	
- <i>George Prosper 2</i>	2009 – 2016	642	Oui
- <i>Rivière Eastmain</i>	2009 – 2016	583	Oui
<b>Rivière Némiscau HQP</b>	2009 – 2016		
- <i>Némiscau 1</i>		9	Oui/influencé
- <i>Némiscau 2</i>		2	Oui/influencé
<b>Rivière Arques HQP</b>	2009 – 2016	3	Oui/influencé
<b>Bassin de mise en charge - Tunnel HQP (Tommy-Neeposh)</b>	2009 - maintenant	596	Oui/Influencé

### 3.1.2.2 Climat

Hydro-Québec dispose d'un réseau important de stations météorologiques, à partir desquelles des grilles d'une résolution de 25 km sont produites. Les variables calculées pertinentes pour la modélisation hydrodynamique sont entre autres les précipitations liquides et solides et les températures minimales et maximales journalières. Les figures 3-4 et 3-5 présentent respectivement la climatologie pour ces variables calculées à partir des grilles d'Hydro-Québec. Ainsi, une précipitation annuelle moyenne de 791 mm et une température maximale et minimale annuelle moyenne de 3,8 et -6,9 °C ont été calculées pour le période de 1950-2018.

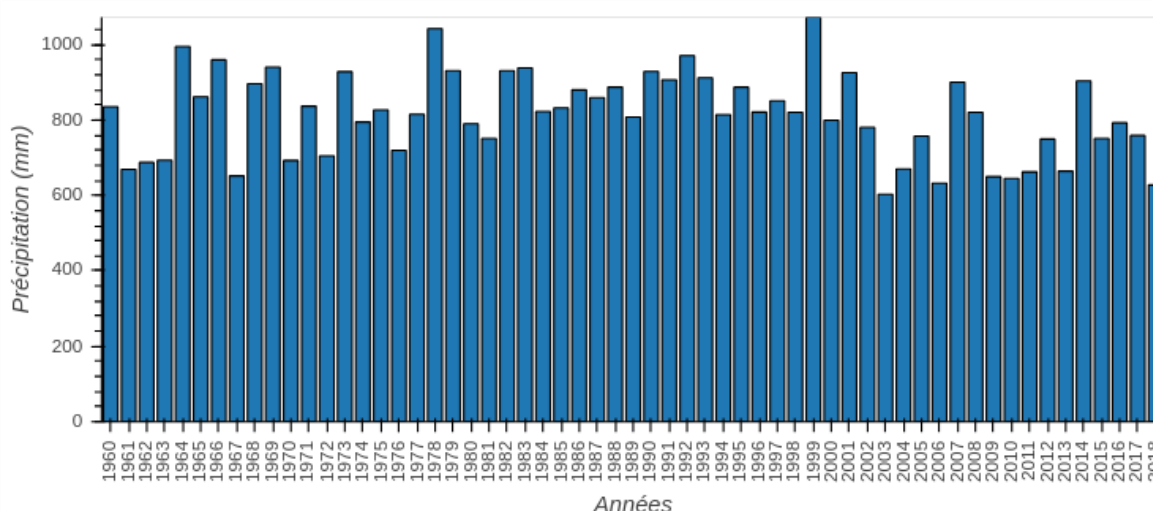


Figure 3-4 Précipitation annuelle au réservoir Eastmain-1

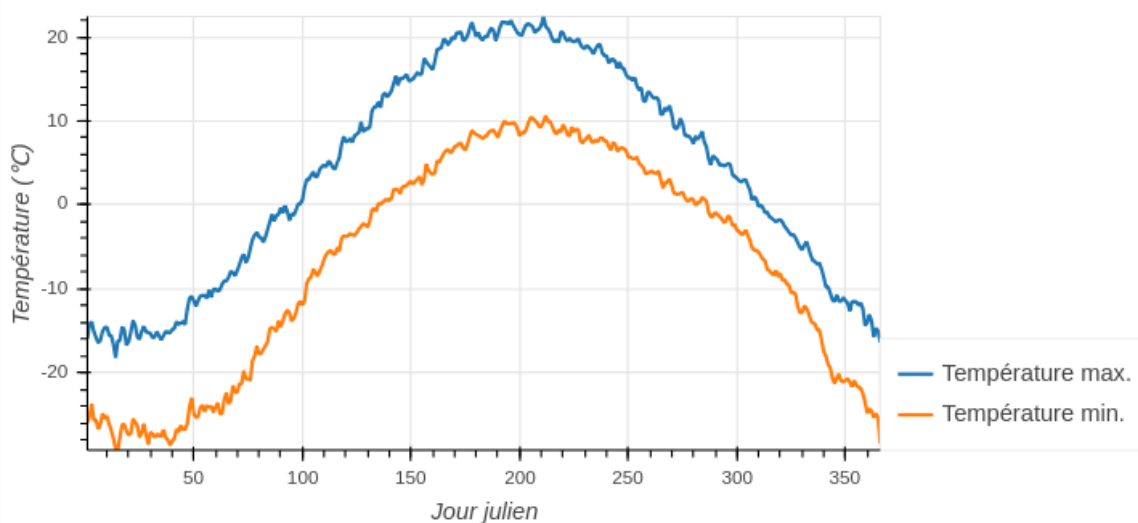


Figure 3-5 Température maximale et minimale journalière moyenne.



Hydro-Québec ne produit pas de grilles de vent, même si elle possède des stations de mesures. Pour les fins de la modélisation, les réanalyses du modèle ERA5 de l'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) sont plutôt retenues [Hennermann, 2019]. Ces réanalyses couplent l'assimilation de données d'observations au modèle de prévisions de l'ECMWF, l'*Integrated Forecast System* (IFS). La qualité de ces réanalyses a été étudiée au Québec et plusieurs variables analysées sont généralement équivalentes ou plus performantes que les grilles d'observations publiques pour la modélisation hydrologique [Tarek et al., 2019].

## 3.2 Description du modèle TELEMAC

### 3.2.1 Contexte

Le modèle TELEMAC est un programme de modélisation numérique basé sur les éléments finis qui résout les équations de Saint-Venant à chaque nœud d'un maillage bidimensionnel dans un plan x-y pour le cas à 2D et tridimensionnel dans un plan x-y-z pour le cas à 3D. Le modèle fonctionne par défaut en mode transitoire et calcule 3 à 4 variables à chaque pas de temps : une hauteur d'eau (m), une vitesse moyenne en x (m/s) et en y (m/s) ainsi qu'en z pour le cas à 3D (m/s). TELEMAC est développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la Direction Recherche et Développement d'EDF (Électricité de France) et est offert comme logiciel libre sous la licence GPLv3 depuis janvier 2010. Le modèle est utilisé pour des applications maritimes et fluviales ainsi que pour des applications en hydraulique à surface libre [Hervouet, 2007]. TELEMAC est originellement programmé dans le langage FORTRAN, mais offre des API (Interface de Programmation Informatique) dans les langages de scripts PERL et Python. Ceux-ci facilitent l'interaction avec le modèle et permettent de faciliter l'ensemble des processus dans des projets complexes. Enfin, le programme est compatible avec les standards MPICH et OpenMPI. Le protocole MPI (*Message Passing Interface*) est un standard de communication pour les architectures informatiques parallèles.

### 3.2.2 Éléments théoriques

Le modèle TELEMAC-2D résout simultanément les équations 3-1 à 3-3 provenant des équations de Saint-Venant :

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \vec{u} \vec{\nabla}(h) + h \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (3-1)$$

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \vec{u} \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\delta Z}{\delta x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad (3-2)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + \vec{u} \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\delta Z}{\delta y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (3-3)$$

où  $h$  est la hauteur d'eau (m),  $u$  et  $v$  sont les composantes de vitesse (m/s),  $g$  est la constante de l'accélération gravitationnelle (m/s<sup>2</sup>),  $Z$  est la cote de la surface libre (m),  $t$  est le temps (s),  $x$  et  $y$  sont les composantes dans l'espace à deux dimensions (m),  $S_h$  est le terme de source/puits du fluide,  $S_x$  et  $S_y$  sont les composantes dynamiques du terme de source/puits.

Pour sa part, le modèle TELEMAC-3D résout les équations 3-4 à 3-7 :

$$\frac{\delta U}{\delta x} + \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{\delta W}{\delta z} = 0 \quad (3-4)$$

$$\frac{\delta U}{\delta t} + U \frac{\delta U}{\delta x} + V \frac{\delta U}{\delta y} + W \frac{\delta U}{\delta z} = -g \frac{\delta Z}{\delta x} + \nu \Delta(U) + F_x \quad (3-5)$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} + U \frac{\delta V}{\delta x} + V \frac{\delta V}{\delta y} + W \frac{\delta V}{\delta z} = -g \frac{\delta Z}{\delta y} + \nu \Delta(V) + F_y \quad (3-6)$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g(Z - z) + \rho_0 g \int_z^Z \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz' \quad (3-7)$$

où  $h$  est la hauteur d'eau (m),  $U$ ,  $V$  et  $W$  sont les composantes de vitesse (m/s),  $g$  est la constante de l'accélération gravitationnelle (m/s<sup>2</sup>),  $Z$  et  $z$  sont respectivement la cote de la surface libre (m) et la composante verticale dans l'espace,  $t$  est le temps (s),  $x$  et  $y$  sont les composantes horizontales (m),  $p_{atm}$  et  $p$  sont respectivement la pression atmosphérique et la pression,  $\nu$  est la viscosité cinématique (m<sup>2</sup>/s),  $\rho_0$  et  $\rho$  sont respectivement la référence de densité et la variation de la densité par rapport à la référence,  $F_x$  et  $F_y$  sont les composantes des termes de source/puits.

### 3.3 Mise en œuvre du modèle

Les intrants requis pour configurer le modèle hydrodynamique sont présentés dans cette section. Les 4 fichiers présentés ci-dessous sont obligatoires pour générer une simulation.

- Fichier de définition des conditions aux limites (.cli)
- Fichier des conditions d'écoulement aux limites (.qsl)
- Fichier de coordonnées et de description des éléments finis (.slf)
- Fichier de configuration de la simulation (.cas)

### 3.3.1 Maillage

Le maillage a été créé à l'aide du programme SALOME [Ribés et al., 2017], lequel est activement utilisé dans plusieurs domaines d'ingénierie requérant des analyses par éléments finis. Les modules HYDRO, GEOMETRY, MESH et HYDROSOLVEUR de SALOME sont requis pour générer un maillage complet pour une application hydrodynamique. Cette section présente les étapes les plus importantes à la constitution du maillage, à savoir la mise en œuvre de la bathymétrie, la définition de zones d'écoulement ainsi que les algorithmes de génération et de validation du maillage.

#### 3.3.1.1 Bathymétrie

La mise en service du réservoir Eastmain-1 ayant débuté à partir de l'année 2007, il est envisageable de recourir à un modèle numérique de terrain (MNT) ayant été généré avant cette période pour constituer une estimation de la bathymétrie. Bien qu'il n'existe actuellement pas de MNT à haute résolution pour l'ensemble du Canada, le modèle numérique de surface (MNS) du Canada [Gouvernement du Canada, 2013] a été retenu puisque ce produit est basé sur la mission SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) [Farr et al., 2007] de l'an 2000, avant la période de mise en eau du réservoir. La plus haute résolution spatiale du produit SRTM est de 30 mètres et après post-traitement, le MNS du Canada a été régénéré à une résolution spatiale de 20 mètres. L'altitude est définie par rapport au système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28). Pour avoir une évaluation plus réaliste de la bathymétrie, des produits d'altitude du couvert végétal ont été explorés afin d'évaluer s'il est possible de constituer un MNT à partir du MSN canadien, la différence étant attribuable au couvert végétal. Les cartes de hauteur de canopée LiDAR existent au Québec, mais ne sont actuellement pas disponibles pour le domaine d'étude. Ainsi, aucune grille de hauteur de canopée n'a été trouvée à une résolution spatiale suffisamment précise (100 mètres ou moins). Dans ce contexte, le MNS du Canada a été retenu sans application de correction pour le couvert végétal. On émet l'hypothèse que l'erreur associée au MNT aura des répercussions négligeables sur les résultats des simulations, notamment les vitesses d'écoulement et les niveaux d'eau, considérant la profondeur du réservoir. Cette hypothèse

Toutefois, la grille de bathymétrie a été modifiée afin de prendre en compte l'ensemble des digues présentes autour du réservoir. Comme il est mentionné à la section 3.3.2, il est tout à fait possible de limiter le maillage du modèle sur une digue et de définir une condition aux limites fermée pour empêcher le passage de l'écoulement. Toutefois, les surverses au-dessus des digues sont possibles et ce scénario ne serait pas couvert par une telle approche. Ainsi, la bathymétrie a été ajustée pour tenir compte des digues présentées à la figure 3-6.

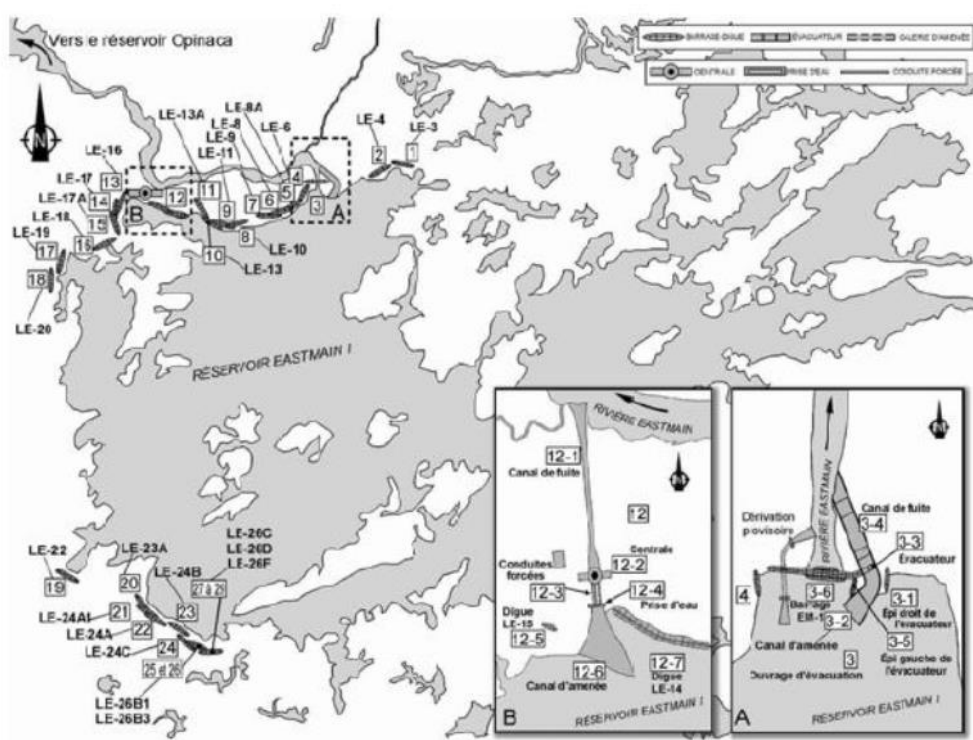


Figure 3-6 Dignes présentes sur le réservoir d'Eastmain-1 © Hydro-Québec, 2018. Reproduit avec permission

Enfin, la grille a été projetée en UTM 18N depuis le datum géodésique NAD83 défini dans le registre géodésique EPSG par le code 26918. Étant donné que le modèle TELEMAC utilise une précision de virgule flottante à 32 bits, le domaine a été converti d'une référence globale à une référence locale en définissant la coordonnée (420 000, 5 750 000) mètres, soit la coordonnée au sud-ouest de la grille bathymétrique, par (0, 0) mètre afin de limiter le risque d'erreur de troncature.

### 3.3.1.2 Zones d'écoulement et algorithmes de génération du maillage

La génération du maillage a été complétée en définissant deux zones, à savoir le lit mineur de la rivière ainsi que les zones inondables. Le lit mineur correspond à la rivière naturelle qui a précédé la mise en eau du réservoir. Celui-ci est représenté par la zone en bleu (basse altitude) de la bathymétrie présentée à la figure 3-7. La discrétisation du maillage de l'ensemble du domaine a été générée à l'aide de l'algorithme Netgen 1D-2D de SALOME avec des bornes de 1000 et 10 mètres. Des sous-domaines ont été créés pour raffiner le maillage. D'une part, l'algorithme Mefisto de SALOME, qui est plus flexible pour des géométries irrégulières, a été utilisé pour le lit mineur. D'autre part, pour les conditions aux limites ouvertes, l'algorithme *Wire Discretisation* de SALOME a été forcé avec un nombre de 12 nœuds par frontière. De cette manière, un nombre suffisant de nœuds est généré pour bien représenter l'écoulement à l'entrée et aux sorties du modèle.

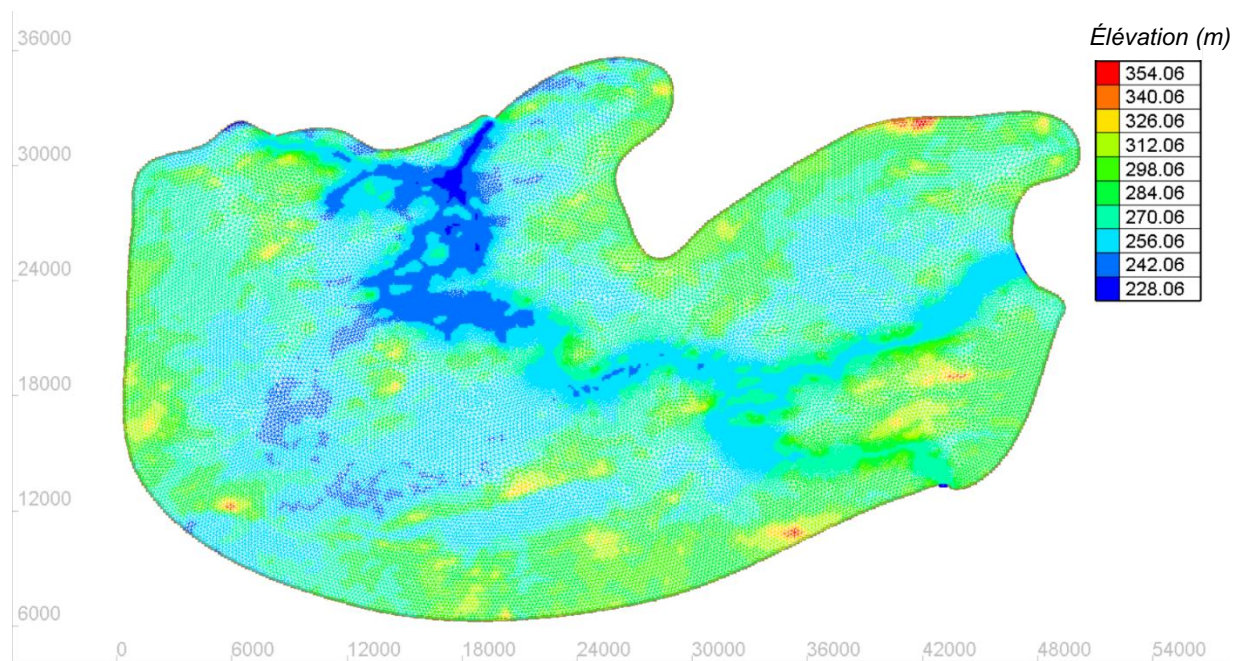


Figure 3-7 Présentation du maillage global et de la bathymétrie du réservoir Eastmain-1 (m)

Par ailleurs, une vue plus détaillée du maillage du réservoir Eastmain-1 est présentée aux figures 3-8 et 3-9, lesquelles représentent respectivement le maillage amont et aval du réservoir. La plage de couleurs représentant l'élévation de la bathymétrie suit les mêmes plages que celles présentées à la figure 3-7.

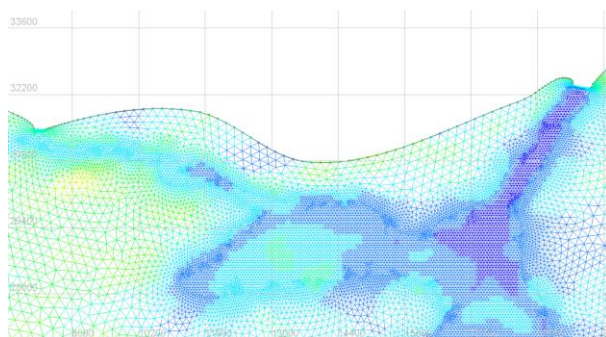


Figure 3-8 Maillage aval du modèle

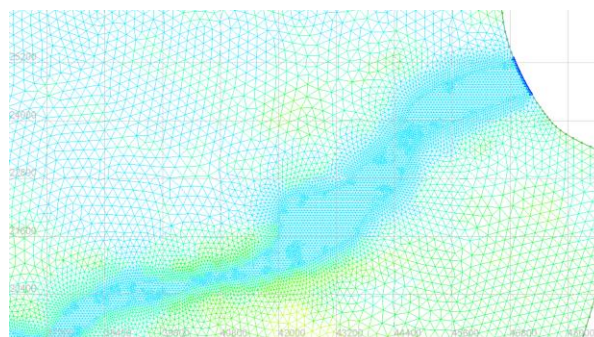


Figure 3-9 Maillage amont du modèle

### 3.3.2 Conditions aux limites

TELEMAC permet de définir un ensemble de conditions aux limites du modèle. Les conditions typiques sont présentées au tableau 3-2.

Tableau 3-2 Type de conditions aux limites du modèle TELEMAC

Type de conditions aux limites	Code
Frontière fermée (mur)	222
Frontière ouverte avec débit (Q) fixe	455
Frontière ouverte avec hauteur d'eau (H) fixe	544
Frontière ouverte avec Q et H fixe	555
Frontière ouverte avec les champs de vitesse U et V fixe	466
Frontière ouverte avec les champs de vitesse U et V ainsi que H défini	566

Il est communément admis que les conditions aux limites typiques d'un modèle hydrodynamique sont une condition aux limites avec le débit (Q) fixe à l'amont ainsi qu'une condition ouverte de hauteur d'eau (H) à l'aval [Hervouet, 2007]. Bien que ces conditions soient adaptées pour le cas d'une rivière, elles ne sont pas nécessairement adaptées au cas d'un réservoir dont la pente est faible et dont le débit sortant est régularisé à l'aide de turbines et de vannes évacuatrices, tel que pour le réservoir Eastmain-1.

Plusieurs conditions aux limites ont été évaluées pour le cas d'Eastmain-1 et sont rapportées au tableau 3-3 d'après la convention des frontières présentées à la figure 3-10.



Tableau 3-3 Scénarios évalués pour les conditions aux limites du modèle TELEMAC-2D

Type de condition aux limites	Frontière 1 : Entrée du canal C1 (Rupert)	Frontière 2 Entrée de la rivière Eastmain	Frontière 3 Aménagement Eastmain-1A	Frontière 4 Aménagement Eastmain-1
Scénario 1q_1h	222	455	544	222
Scénario 1q_2h	222	455	544	544
Scénario 1q_1qh	222	455	555	222
Scénario 1q_2qh	222	455	555	555
Scénario 2q_2qh	455	455	555	555

Les 5 scénarios définis au tableau 3-3 suivent la nomenclature suivante :

- Nombre de conditions aux limites à l'entrée : 1 ou 2
- Condition aux limites à l'entrée : débit (q)
- Nombre de conditions aux limites à la sortie : 1 ou 2
- Condition aux limites à la sortie : débit et hauteur imposés (qh) ou hauteur imposée (h)

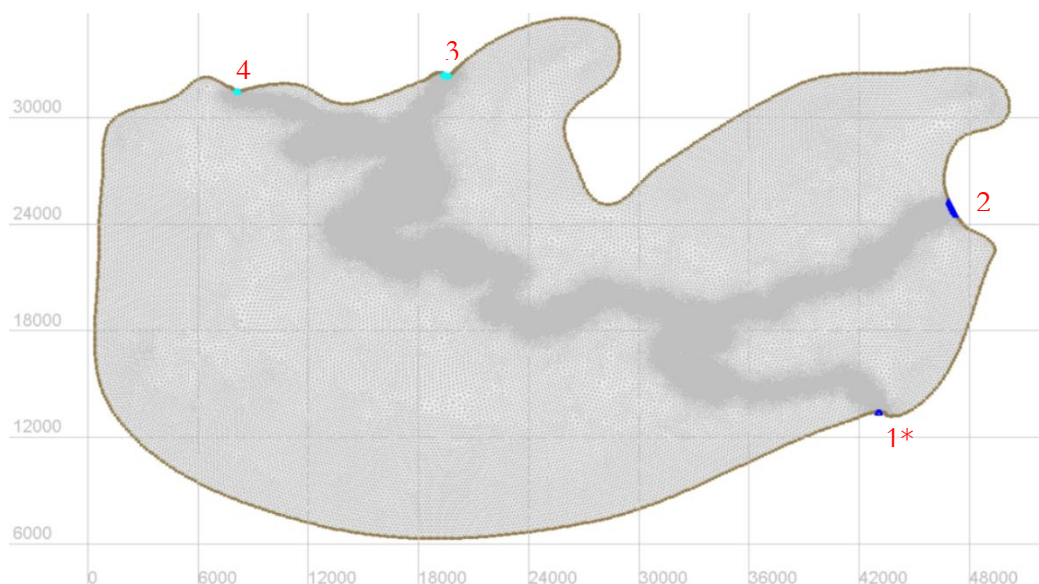


Figure 3-10 Sections définies comme conditions aux limites ouvertes pour le réservoir Eastmain-1. Les conditions frontières en bleu représentent les limites entrantes alors que les conditions frontières en turquoise représentent les limites sortantes. La condition frontière 1\* n'a pas été retenue dans le modèle final (voir explication ci-dessous)

La principale distinction entre les différents scénarios de conditions aux limites est le choix de la condition 544 (H fixe) ou 555 (H et Q fixe) aux frontières 3 et 4. Le premier cas est généralement retenu, car il facilite la convergence du modèle et est plus en accord avec la théorie de l'hydraulique à surface libre pour un écoulement fluvial, laquelle ne requiert qu'une seule condition à la frontière [Hervouet, 2007]. L'inconvénient de cette approche est qu'il est possible, étant donné la très faible pente du réservoir, que le débit circule dans deux directions (entrant et sortant), ce qui n'est pas représentatif d'un barrage dont le débit ne peut être que sortant. Dans le cas d'Eastmain-1, la seconde condition, quoique plus contraignante pour atteindre la convergence, est peut-être mieux adaptée, car elle permet de contrôler à la fois la hauteur d'eau et de s'assurer que le débit soit toujours sortant dans le domaine.

Le scénario *2q\_2qb* considère un débit à l'entrée sud (frontière 1) du réservoir alors que pour les autres scénarios, ce débit est concaténé avec celui de la section 2. Étant donné la bathymétrie disponible, le modèle TELEMAC n'est pas en mesure de converger avec ce scénario. Il est possible de modifier la bathymétrie environ jusqu'à la confluence des frontières 1 et 2 afin de faire converger le modèle. Toutefois, dans ce contexte, cela devient à peu près équivalent à concaténer les deux débits dans le lit mineur de la rivière à la frontière 2. Ainsi, pour éviter de modifier arbitrairement la bathymétrie, le scénario *2q\_2qb* a été rejeté à la faveur des autres alternatives. Ces alternatives sont comparées dans la section 3.4.2.

### 3.3.3 Sollicitations externes

Un des éléments pertinents de TELEMAC est la possibilité d'ajouter des sollicitations externes aux modèles, par exemple de la précipitation ou du vent sur chaque nœud du modèle. Pour le cas d'Eastmain-1, la précipitation sur le réservoir est déjà incluse dans les débits d'apport utilisés à la frontière 2 du modèle et ne fera donc pas l'objet d'une modélisation explicite. Toutefois, le vent est considéré pour la modélisation d'un réservoir, car il peut engendrer un déplacement de masses d'eau, notamment en cas de tempête. Il convient donc de le modéliser pour évaluer son impact sur les variations spatiales et temporelles des niveaux d'eau dans le réservoir.

Comme décrit à la section 3.1.1.2, les séries de vent du modèle ERA5 ont été retenues. ERA5 propose des séries de vent à 10 mètres au-dessus de la surface dans le plan cartésien ( $u_{10}$  et  $v_{10}$ ) à un pas de



temps horaire, de 1950 à aujourd'hui, dans le référentiel UTC-00:00. Les données ont été converties en heure de l'Est pour être conformes avec les stations d'Hydro-Québec. Par ailleurs, pour augmenter le réalisme des simulations, les données de vent à 10 mètres ont été converties à une hauteur de 2 mètres au-dessus de la surface à l'aide d'un facteur de conversion qui provient de l'équation 47 de profil de vent recommandé par Allen et al. [1998] (éq. 3-8) où  $U$  est la vitesse du vent (m/s) et  $z$  est la hauteur en mètres depuis la surface de la Terre.

$$\frac{U_{z=2}}{U_z} = \frac{4,87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (3-8)$$

La figure 3-11 présente la fréquence (%) et l'intensité du vent en fonction de la direction de sa provenance pour le réservoir Eastmain-1 à partir des données horaires d'ERA5 couvrant le réservoir. Ainsi, les vents en provenance d'ouest et d'est sont les plus importants sur le domaine d'étude.

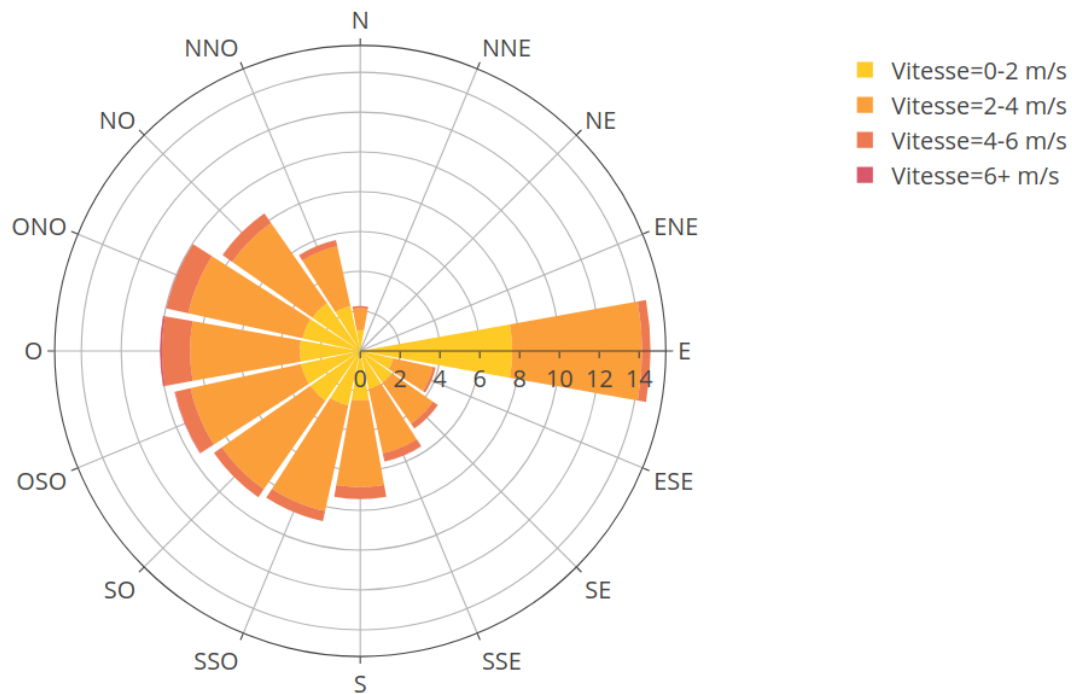


Figure 3-11 Distribution de l'intensité et de la direction de provenance du vent sur le réservoir Eastmain-1

### 3.3.4 Configuration de la modélisation

Pour générer une simulation hydrodynamique dans TELEMAC, plusieurs paramètres généraux doivent être configurés (dans le fichier .cas). Cette section décrit les principaux éléments de configuration définis pour la modélisation d'Eastmain-1 après plusieurs essais successifs. La modélisation utilise la méthode du gradient conjugué comme solveur et utilise la librairie PARTEL, recommandé par TELEMAC, pour subdiviser le maillage lors du calcul.

Le pas de temps a été optimisé pour assurer la convergence du modèle et limiter le nombre d'itérations, notamment en présence de vent. Ainsi, le pas de temps final est de 30 secondes. La simulation débute du 01 mai 2015 et se termine le 30 septembre 2015, ce qui correspond à 440 640 pas de temps. Cette période a été choisie puisqu'elle correspond au remplissage du réservoir en période de crue printanière et que les conditions d'écoulement s'apparentent à des conditions de surface libre (les effets de glace sont limités). Les débits entrants (apports) et sortants sont présentés à la figure 3-12 et le niveau du réservoir, mesuré par la station RESEAST.MSAT, est montré à la figure 3-13.

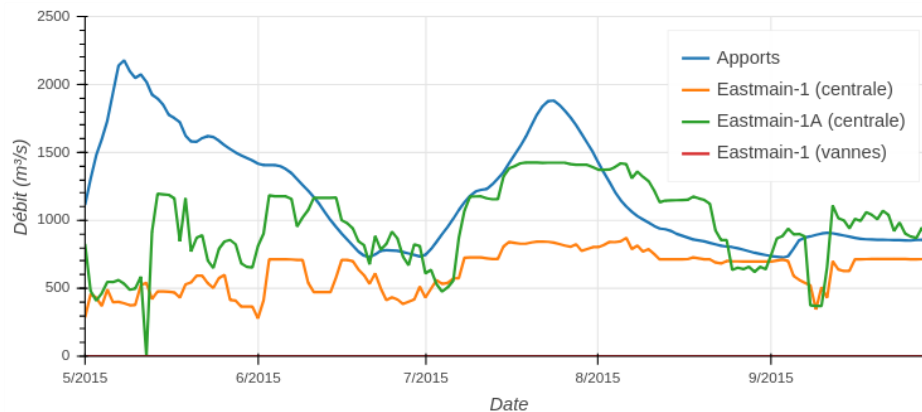


Figure 3-12 Apports et débits sortants du réservoir Eastmain-1 en 2015

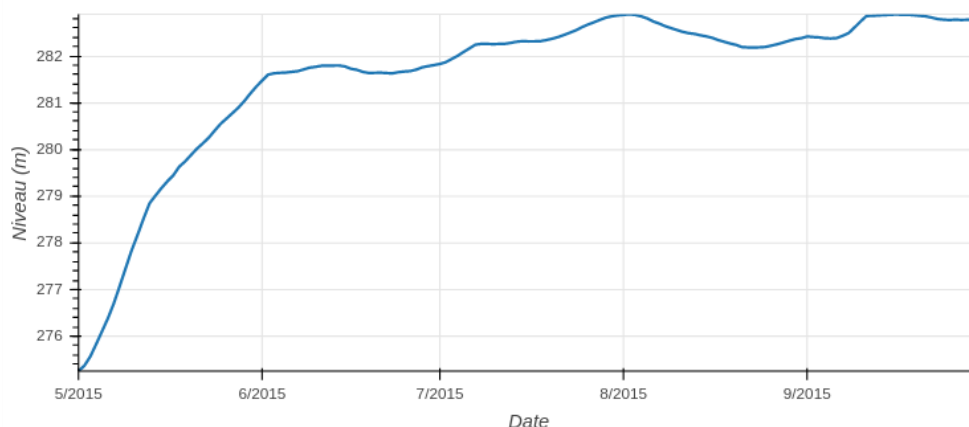


Figure 3-13 Évolution du niveau d'Eastmain-1 estimé par la station RESEAST.MSAT en 2015

## 3.4 Simulations

### 3.4.1 Analyse de sensibilité du paramètre de frottement

Étant donné que l'ensemble des stations de mesures de qualité sont utilisées aux conditions aux limites du modèle TELEMAC, il n'est pas possible d'utiliser une station pour faire le calage du paramètre de frottement. Toutefois, pour un réservoir de la taille d'Eastmain-1, dont la profondeur atteint plus de 60 mètres au nord du réservoir, il n'est pas attendu que le paramètre de frottement ait un impact majeur sur la modélisation. Afin de valider cette hypothèse, une analyse de sensibilité a été réalisée dans des conditions d'écoulement stationnaire. Les débits entrants et sortants du modèle ont été fixés à  $1450 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit le débit d'apport du 01 mai 2015.

La figure 3-14 présente l'évolution du niveau moyen du réservoir en fonction du choix de coefficient de rugosité de Manning sur l'ensemble du réservoir. Le niveau moyen varie au maximum de 0,3 mm entre un coefficient de Manning de 0,02 et 0,05. L'impact du coefficient de Manning sur le niveau moyen est donc considéré négligeable. Ainsi, une valeur typique de 0,033, laquelle est souvent utilisée pour des canaux naturels à fond propre avec peu d'herbes et de cailloux, été retenue pour le reste de l'étude, bien qu'une autre valeur aurait également pu être considérée sans impact majeur.

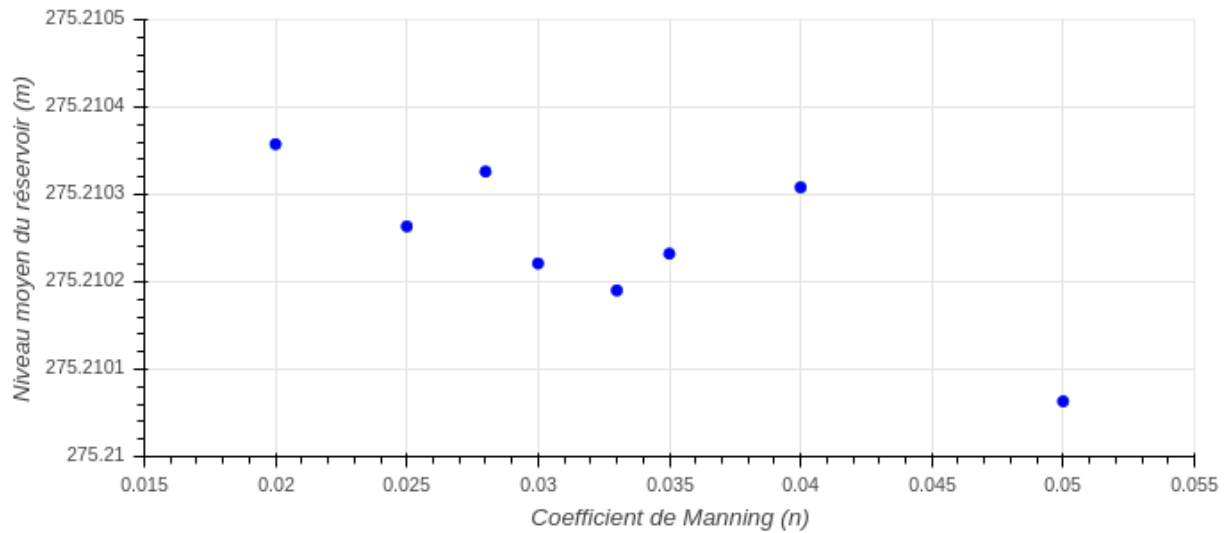


Figure 3-14 Évolution du niveau moyen (m) du réservoir Eastmain-1 en fonction du coefficient de Manning global du modèle

### 3.4.2 Impact des conditions aux limites

La figure 3-15 présente l'évolution du niveau d'eau entre l'ensemble des scénarios et celui de la station RESEAST.MSAT localisée dans la partie nord du réservoir. Dans l'ensemble, les résultats sont cohérents et suivent adéquatement la tendance de la station RESEAST.MSAT. Toutefois, la condition aux limites de niveau d'eau des scénarios *1q\_1b* et *1q\_2b* implique qu'à certains moments de la simulation, un fort débit entre dans le modèle aux sections 3 et 4, ce qui physiquement ne devrait pas être le cas, et ce qui amène le niveau d'eau à augmenter considérablement plus haut que prévu. Ainsi, comme l'évaluation la plus précise des niveaux d'eau est une contrainte forte de cette étude, ces scénarios ne sont plus considérés pour la suite.

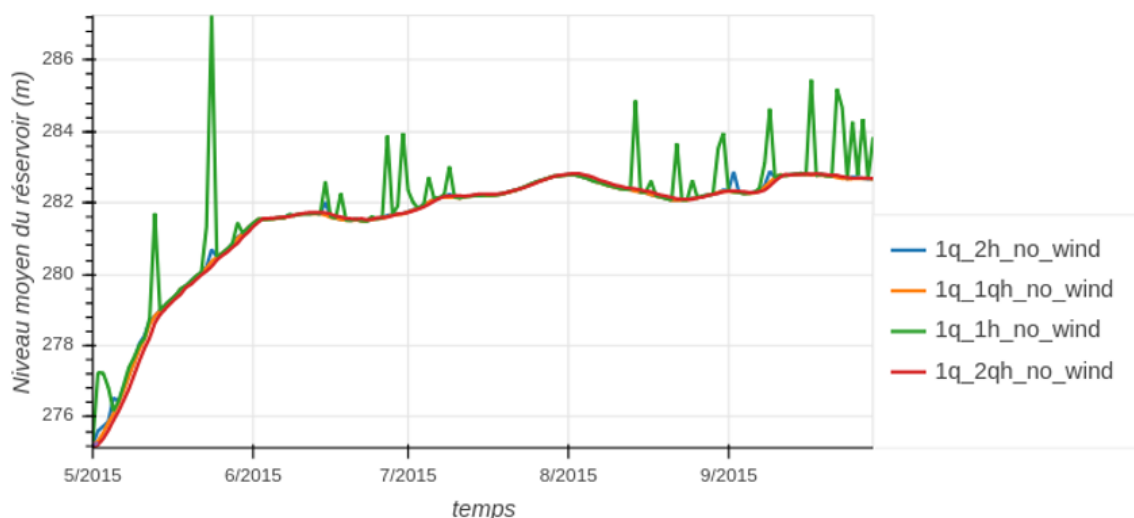


Figure 3-15 Comparaison du niveau moyen (m) du réservoir en fonction du scénario aux conditions limites

La figure 3-16 montre l'écart du niveau d'eau moyen entre les scénarios *1q\_1qh* et *1q\_2qh* et l'observation de la station RESEAST.MSAT. Il convient ici de rappeler que la station RESEAST.MSAT est utilisée comme condition aux limites pour le niveau d'eau et non comme une station pour valider l'adéquation générale des niveaux d'eau du modèle. Toutefois, étant donné la complexité de modéliser la régularisation des débits d'eau sortant et l'absence de données supplémentaires, la station demeure un point de comparaison avec le niveau moyen du réservoir, si ce n'est que pour comparer la différence des comportements de chaque scénario de conditions aux limites. Globalement, il n'existe pas de différence significative pour la modélisation du niveau d'eau moyen entre la considération d'un seul ou de deux exutoires.

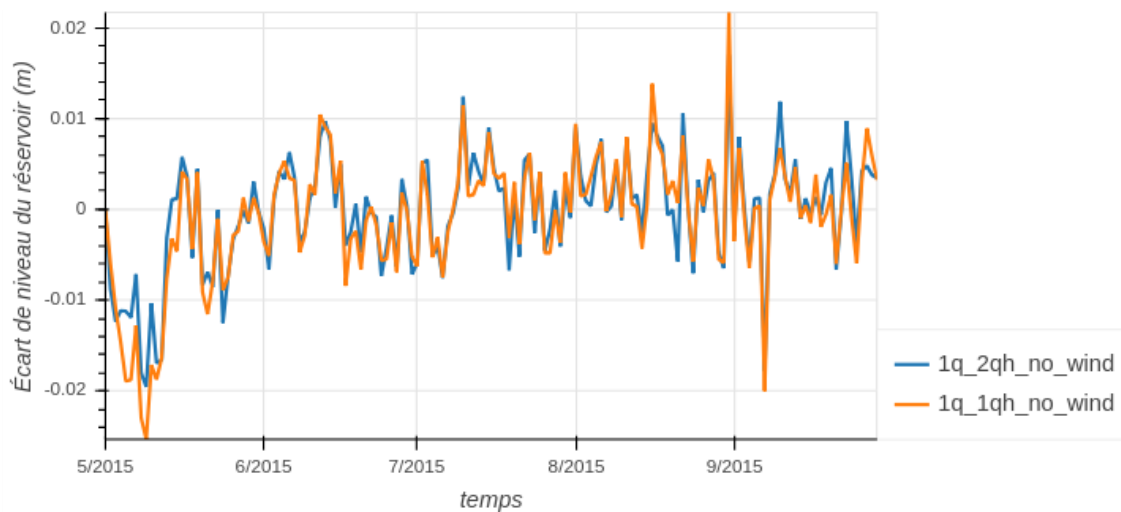


Figure 3-16 Comparaison des scénarios avec 1 et 2 exutoires par rapport au niveau d'eau de la station RESEAST.MSAT (*1q\_1qh* et *1q\_2qh*), vitesse de vent nulle

Enfin, la figure 3-17 présente la distribution des niveaux d'eau pour les scénarios *1q\_1qh* et *1q\_2qh* et le tableau 3-4 compare la moyenne et l'écart-type de la distribution des niveaux d'eau pour la date du 01 juillet (fin de la crue printanière) alors que le réservoir est rempli.

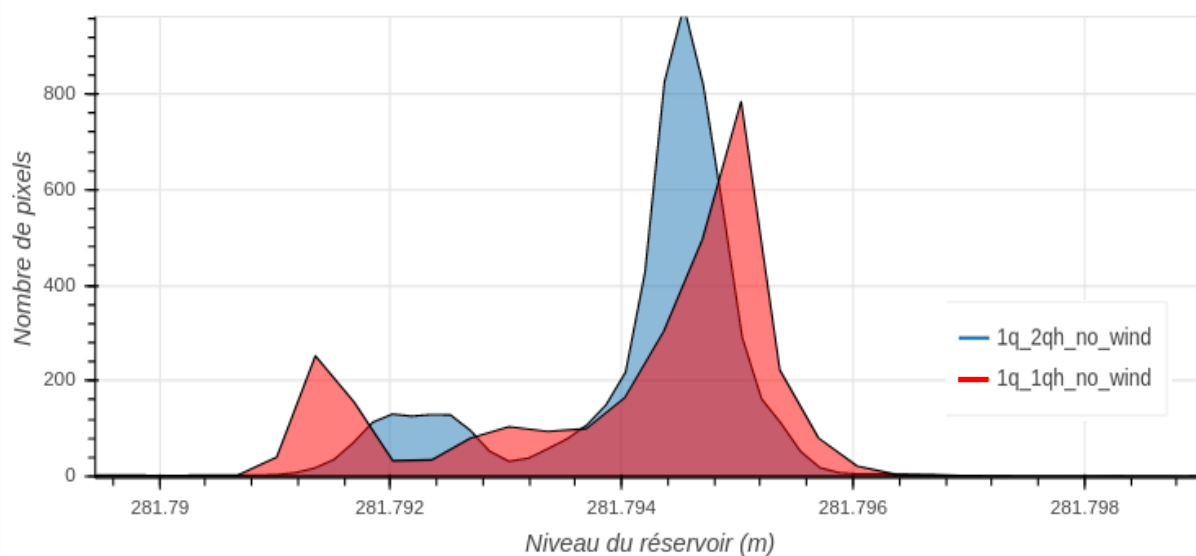


Figure 3-17 Comparaison de la distribution des scénarios avec 1 et 2 exutoires le 01 juillet 2015 (*1q\_1qh* et *1q\_2qh*), vitesse de vent nulle

Tableau 3-4 Comparaison de la moyenne et de l'écart-type des niveaux d'eau (m) lors de la date du 01 juillet 2015

Type de condition aux limites	Moyenne (m)	Écart-type (m)
Scénario 1q_1qh	281,794	1.3E-3
Scénario 1q_2qh	281,794	1.0E-3

À la lumière des résultats ci-dessus, les conditions aux limites *1q\_2qh* et *1q\_1qh* sont à peu près équivalentes. Toutefois, comme les conditions prescrites au scénario *1q\_2qh* sont considérées comme les plus réalistes, elles sont donc choisies pour la poursuite de la modélisation hydrodynamique du réservoir Eastmain-1.

### 3.4.3 Impact du vent et validations

Une modélisation avec et sans considérer l'impact du vent a été réalisée pour la période étudiée (05 mai - 30 septembre 2015). La figure 3-18 présente la comparaison des scénarios *1q\_2qh* avec et sans vent pour la journée où la magnitude moyenne atteinte par le vent étant le plus fort, soit de 5,3 m/s, pour la journée du 27 septembre 2015 (vent d'ouest). L'analyse des figures semble montrer que l'impact du vent est sensiblement négligeable par rapport aux hauteurs d'eau.

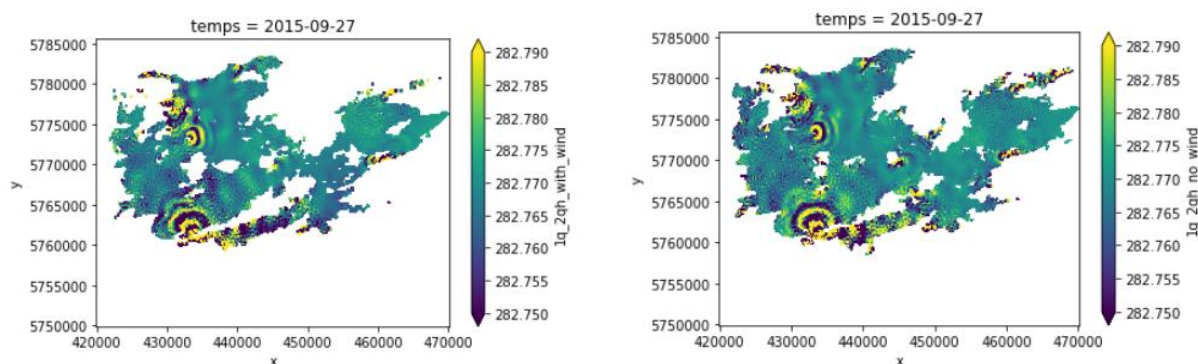


Figure 3-18 Comparaison des niveaux d'eau (m) des simulations 2D avec et sans vent (gauche et droite) le 27 septembre 2015

Il est difficile de modéliser l'impact du vent sur un modèle 2D lorsque les profondeurs d'eau sont très grandes. En effet, comme l'impact du vent est moyenné sur le profil vertical de l'eau, l'impact dans un contexte de réservoir peut être sous-estimé. Dans la réalité, le vent a un impact surtout à la surface et cela est mieux représenté par une modélisation hydrodynamique 3D. Il est possible de remarquer que

la modélisation 2D comporte quelques instabilités à certains pas de temps comme montrés à la figure 3-18. Ceux-ci n'affectent pas significativement le niveau moyen du réservoir. Bien qu'ils puissent être de nature numérique, il est aussi possible que celles-ci soient le reflet des conditions imposées aux frontières du domaine. En effet, tel que montré à la figure 3-19, le niveau de la station RESEAST.MSAT, qui sert de conditions aux limites, varie de manière cyclique le jour du 27 septembre, possiblement en raison de la présence de vents forts. Dans ce contexte, ceci peut avoir un impact sur les sorties du modèle. Par ailleurs, le niveau moyen simulé à la station RESEAST.MSAT est de 282,77 m alors que le niveau moyen simulé au réservoir est de 282,78 m.

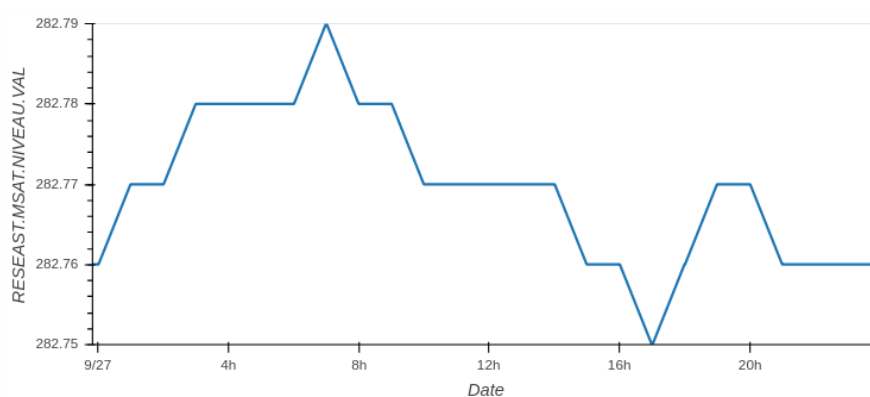


Figure 3-19 Évolution du niveau d'eau à la station RESEAST.MSAT le 27 septembre 2015

Une solution pour réduire ces instabilités pourrait être de lisser les séries aux conditions aux limites. Or, ceci implique un risque de perte d'information et il peut être difficile de départager le signal du bruit.

### 3.4.4 Modélisation 3D

Étant donné qu'il est plus pertinent de modéliser le vent dans un modèle à 3D et que cela pourrait possiblement aider à réduire les instabilités présentes, il a été décidé de recourir à TELEMAC-3D pour simuler le réservoir Eastmain-1. Étant donné que TELEMAC-3D est compatible avec les fichiers générés suivant la méthodologie décrite précédemment, moyennant quelques ajustements de paramètres physiques et numériques, il a été convivial de répéter la simulation en 3D. Le maillage en 3D utilise des coroutines implémentées dans TELEMAC qui combinent l'information du maillage à 2D avec la bathymétrie fournie au modèle afin de générer un maillage à 3D.



La figure 3-20 montre le niveau d'eau dans le réservoir simulé à l'aide de TELEMAC-3D à la même date que pour les simulations en 2D. Il est difficile de discerner l'impact du vent, mais celui-ci ne semble pas très important puisque la différence entre la hauteur d'eau minimale et maximale dans le domaine est d'environ 2 cm (avec les arêtes des maillages variant de quelques dizaines à des centaines mètres). Le coefficient de Pearson a été calculé entre l'écart-type de la distribution des niveaux d'eau et l'intensité du vent pour chaque pas de temps et une corrélation non significative a été trouvée.

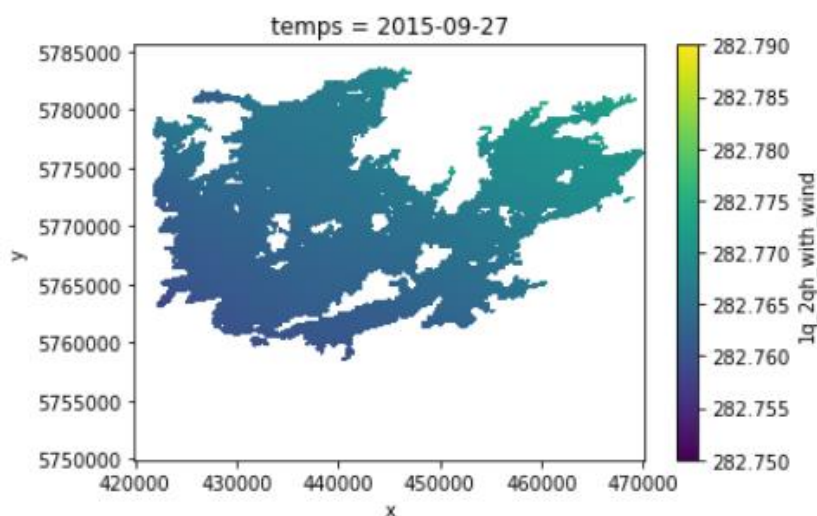


Figure 3-20 Niveau d'eau (m) de la simulation 3D le 27 septembre 2015

La modélisation 3D présentée à la figure 3-20 présente des niveaux beaucoup plus lisses que la modélisation 2D, laquelle comportait des instabilités à la date du 27 septembre 2015 (figure 3-18). Le modèle 3D semble donc converger vers une solution plus réaliste. De plus, tel que montré à la figure 3-21, il existe une corrélation dont le coefficient de Pearson est de 80% entre l'écart-type de la distribution des pixels du niveau d'eau et la dérivée première du niveau moyen de l'eau par rapport au temps. Ainsi, les fortes variations du niveau d'eau général (fonte de la neige, précipitations, opérations) entraînent une pente plus importante du plan d'eau.

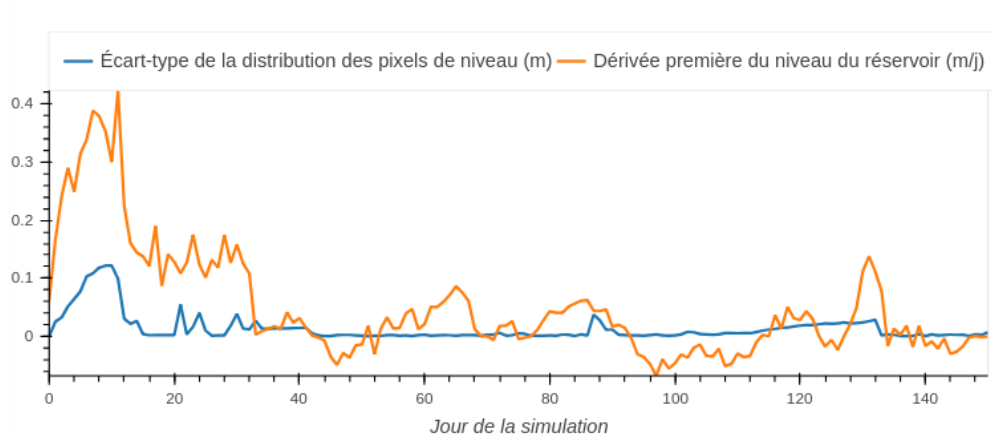


Figure 3-21 Écart-type de la distribution des pixels du niveau et la dérivée première du niveau d'eau par rapport au temps

Un contrôle du bilan de masse est aussi pertinent pour valider la condition atypique de débit et de niveau imposé à la condition limite aval. Globalement, tel que montré à la figure 3-22, le débit sortant filtré à Eastmain-1A correspond bien à celui modélisé avec TELEMAC-3D.

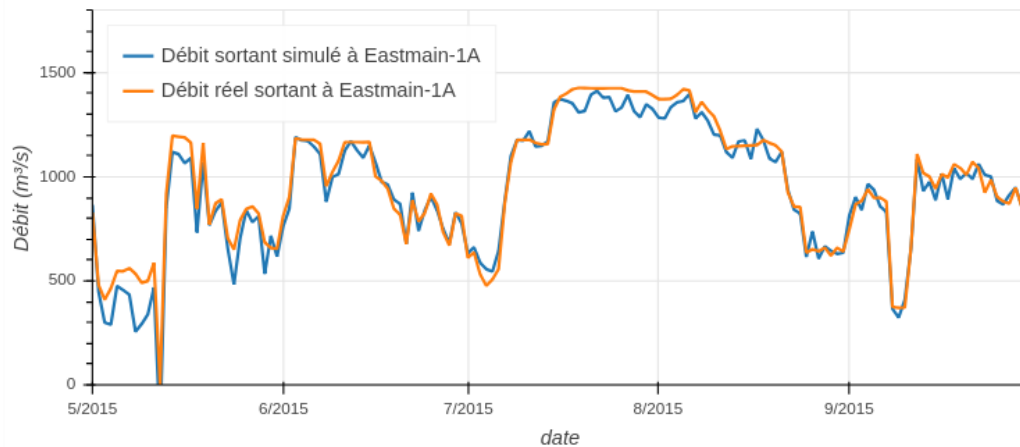


Figure 3-22 Comparaison du débit observé sortant à Eastmain-1A et celui simulé par TELEMAC-3D

Il est également pertinent de comparer la répartition spatiale des hauteurs d'eau au début et à la fin de la période de la simulation. Ainsi, la figure 3-23 compare les simulations entre le 01 mai et le 30 septembre 2015. Entre ces périodes, le volume d'eau stocké dans le domaine est passé de 5325 à 9596 hm<sup>3</sup>. La figure 3-24 présente la différence du niveau entre ces deux dates pour l'ensemble du domaine.

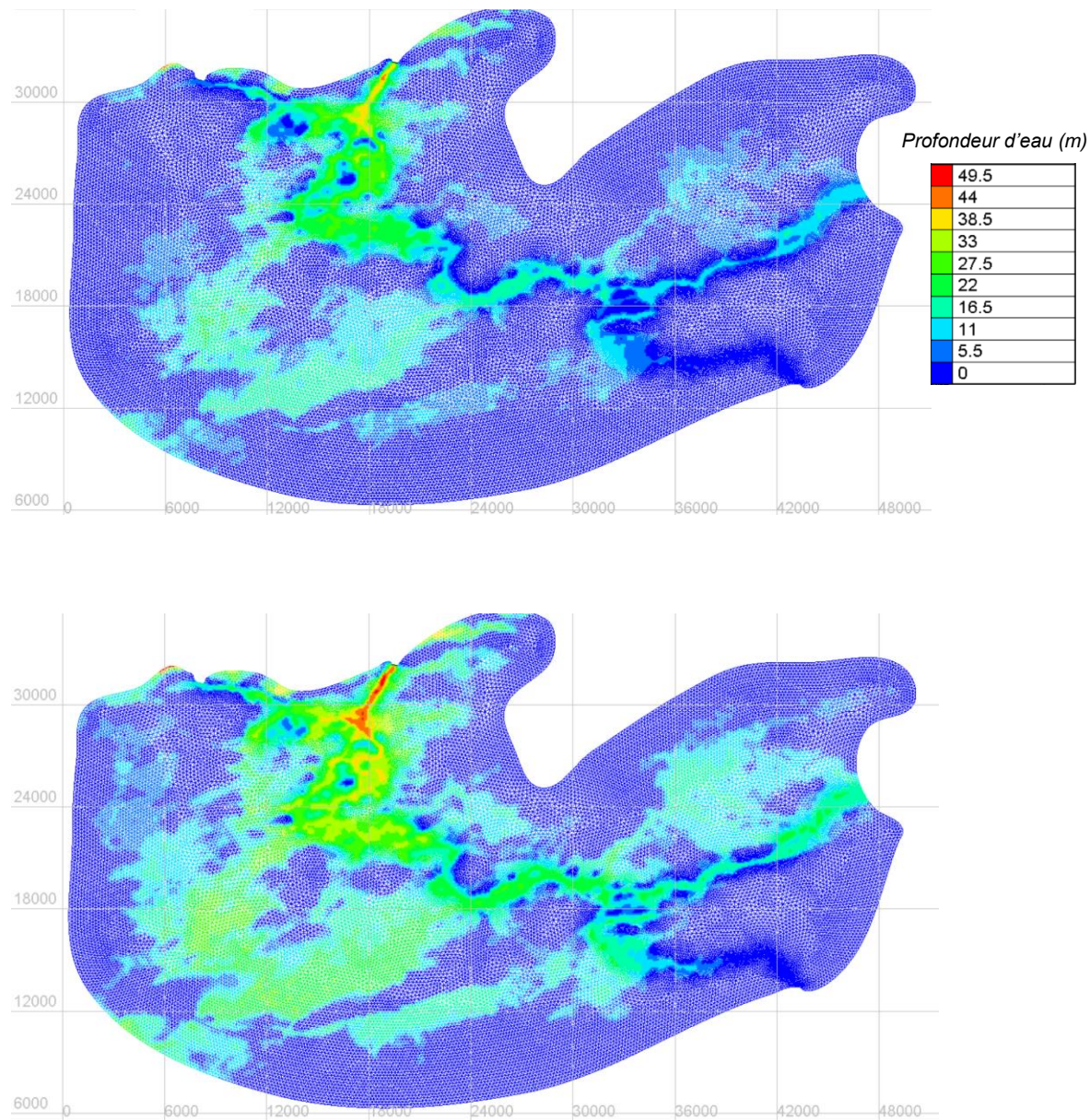


Figure 3-23 Comparaison de la profondeur d'eau (m) du réservoir Eastmain-1 au 01 mai (haut) et au 30 septembre 2015 (bas)

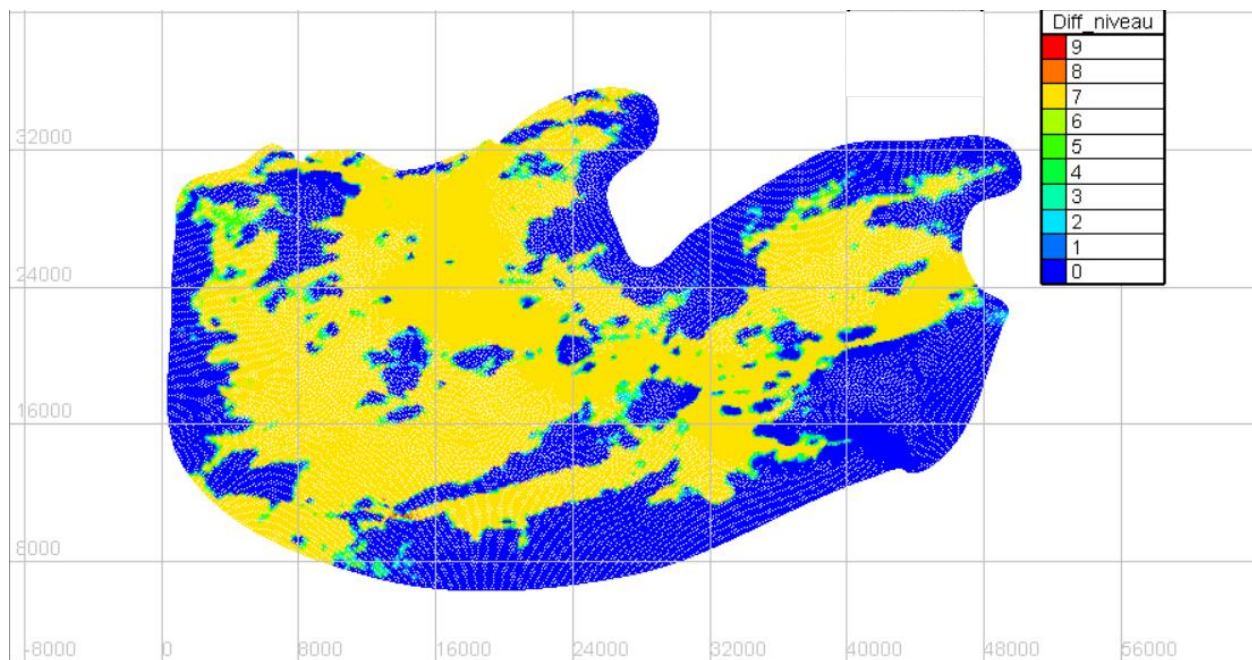


Figure 3-24 Comparaison de la différence de hauteur d'eau (m) du réservoir Eastmain-1 au 01 mai au 30 septembre 2015

Tel que montré à la figure 3-24, la différence de niveau entre le 01 mai et le 30 septembre 2015 est d'environ 7 mètres en moyenne. Ceci est le résultat de la fonte de la neige lors de la crue printanière et des stratégies de gestion qui tendent à maintenir le niveau du réservoir plus élevé lors de la période estivale.

# CHAPITRE 4 GÉNÉRATION DES IMAGES SYNTHÉTIQUES SWOT ET ESTIMATION DE LA QUALITÉ DU BILAN HYDRIQUE

Le satellite SWOT représente un avancement important dans le domaine de l'altimétrie radar, particulièrement en hydrologie continentale. Ce chapitre explique d'abord le fonctionnement de deux simulateurs, SWOT-HR et SWOT-LS, qui sont utilisés dans le cadre de ce chapitre. De plus, des images SWOT synthétiques sont présentées et leur potentiel pour l'évaluation du bilan hydrique du réservoir Eastmain-1 est évalué.

## 4.1 Simulateurs du satellite SWOT

Cette section décrit plus en détail les deux simulateurs du satellite SWOT. Le premier, SWOT-HR, a été développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL), un centre de recherche et développement fédéral géré par l'université Caltech pour le compte de la NASA [JPL, 2015]. Une autre version du simulateur SWOT a été réalisée par la suite par le CNES, soit SWOT-LS. Celui-ci reprend les éléments du simulateur du JPL et pose des simplifications sur la génération des images synthétique SWOT, ce qui permet de générer des simulations beaucoup plus rapidement. Dans l'ensemble de ce chapitre, SWOT-LS est utilisé pour la génération des images synthétiques de niveaux d'eau. Toutefois, SWOT-HR est également utilisé pour réaliser une classification des pixels de niveaux. Ce faisant, le fonctionnement des simulateurs sera décrit ci-dessous en débutant tout d'abord par SWOT-HR, puis en démontrant les simplifications qui ont mené à réaliser le modèle SWOT-LS.

### 4.1.1 Fonctionnement de SWOT-HR et SWOT-LS

#### 4.1.1.1 SWOT-HR

Le simulateur SWOT-HR de JPL constitue la première référence pour générer des images synthétiques SWOT. Ce simulateur a été développé afin de simuler, avant le lancement du satellite, des images que celui-ci pourrait produire en cours de mission. Le simulateur permet de créer des interférogrammes



de niveau 1b (L1b) ainsi que des nuages de pixels d'élévation de niveau 2 (*pixel cloud* L2) et produit une classification du type de surface pour chaque pixel.

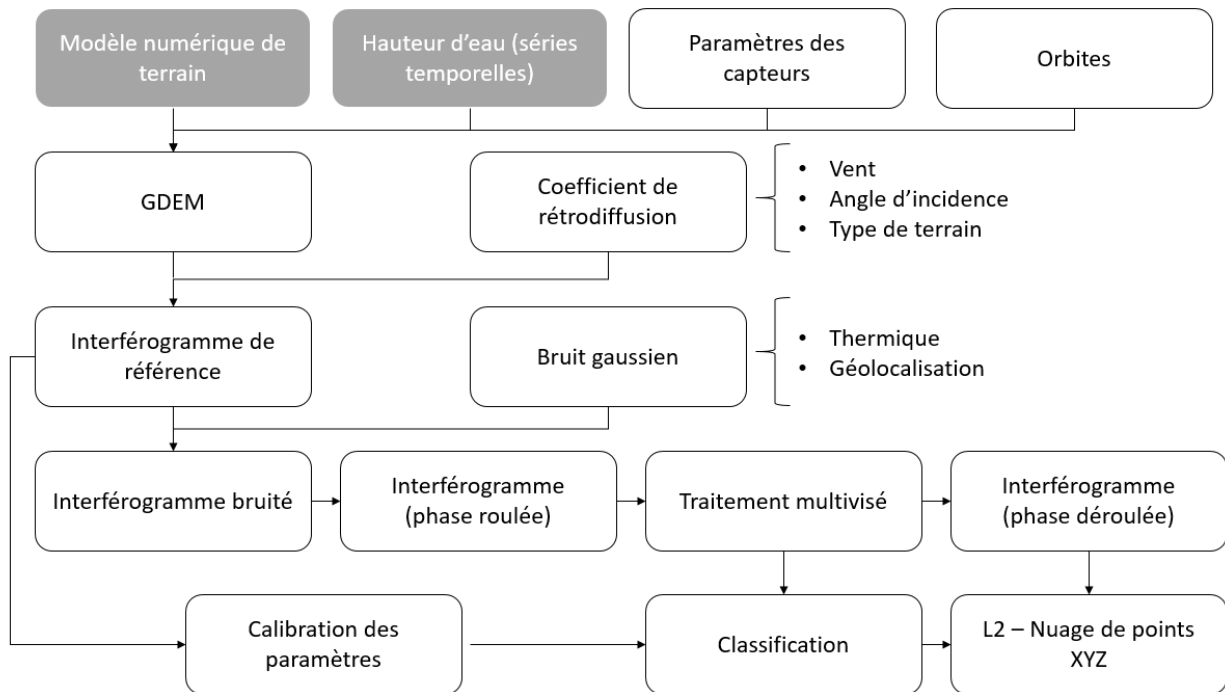


Figure 4-1 – Schéma des principales composantes du simulateur SWOT-HR

Tel que montré à la figure 4-1, deux intrants sont requis pour réaliser une simulation, à savoir : 1) un modèle numérique de terrain (MNT) de la bathymétrie par rapport au géoïde ou l'ellipsoïde ainsi qu'une matrice ayant les éléments suivants : latitude, longitude, hauteur d'eau par rapport au MNT et temps. Les coordonnées doivent être dans le datum WGS84. Plusieurs caractéristiques du satellite sont préconfigurées afin de respecter les critères et les choix de la mission. Par exemple, les caractéristiques des capteurs de même que les orbites finales de la mission sont incluses. L'utilisateur a toutefois l'option de définir d'autres orbites selon les besoins de son étude. Des coefficients de rétrodiffusion sont également suggérés en fonction du type de terrain, de l'angle d'incidence du capteur et de l'impact du vent.

Le simulateur SWOT-HR utilise l'ensemble de ces intrants et caractéristiques afin de générer un interférogramme de référence en coordonnées radar, lequel ne contient pas d'erreur. Un bruit gaussien est ensuite appliqué sur l'interférogramme de référence, lequel est fonction du type de terrain. Bien que la résolution spatiale du capteur à bande Ka soit attendue à 6 m à l'azimut du satellite et de 60 à

10 mètres respectivement à la portée minimale et maximale, un traitement multivisé (*multi-look*) est réalisé sur l'interférogramme bruité. Cette procédure consiste à moyenniser l'information de plusieurs pixels afin d'en améliorer la précision altimétrique, mais au détriment de la résolution spatiale. Trois options de traitement multivisé sont suggérées dans le simulateur, à savoir un traitement brut, médium et fin. Le traitement brut propose de moyenniser 4 pixels vers l'azimut et la portée alors que le cas fin peut aller jusqu'à 20 pixels dans chaque direction. En fonction de la puissance du signal simulé après le traitement multivisé, une classification de chaque pixel est réalisée :

- 1 : Terre ferme (*Land*)
- 2 : Terre près de l'eau (*Land near water*)
- 3 : Eau près de la terre (*Water near land*)
- 4 : Eau intérieure (*Water*)
- 5 : Eau sombre (*Dark water*)

Enfin, après déroulement de la phase, l'interférogramme final est ramené en coordonnées géographiques, lequel devient le produit de nuage de pixels de niveau 2 (L2). Il est important de savoir qu'en fonction des choix de traitement multivisé et de la distorsion causée par la transformation des coordonnées radar en coordonnées géographiques, les nuages de points ne suivent pas nécessairement un maillage régulier.

#### **4.1.1.2 SWOT-LS**

Le simulateur développé par le JPL est plutôt lourd en temps de calcul pour des larges domaines comme Eastmain-1. Le CNES a repris les principes de SWOT-HR et l'a rendu beaucoup plus performant pour des applications sur de grandes superficies, moyennant quelques simplifications. D'abord, les distorsions géographiques ne sont pas prises en compte, tel que le repliement radar. Également, le traitement des nuages de points est idéalisé : aucune erreur de classification des pixels et liée au déroulement de la phase n'est considérée.

La figure 4-2 présente un schéma des composantes principales du simulateur SWOT-LS.

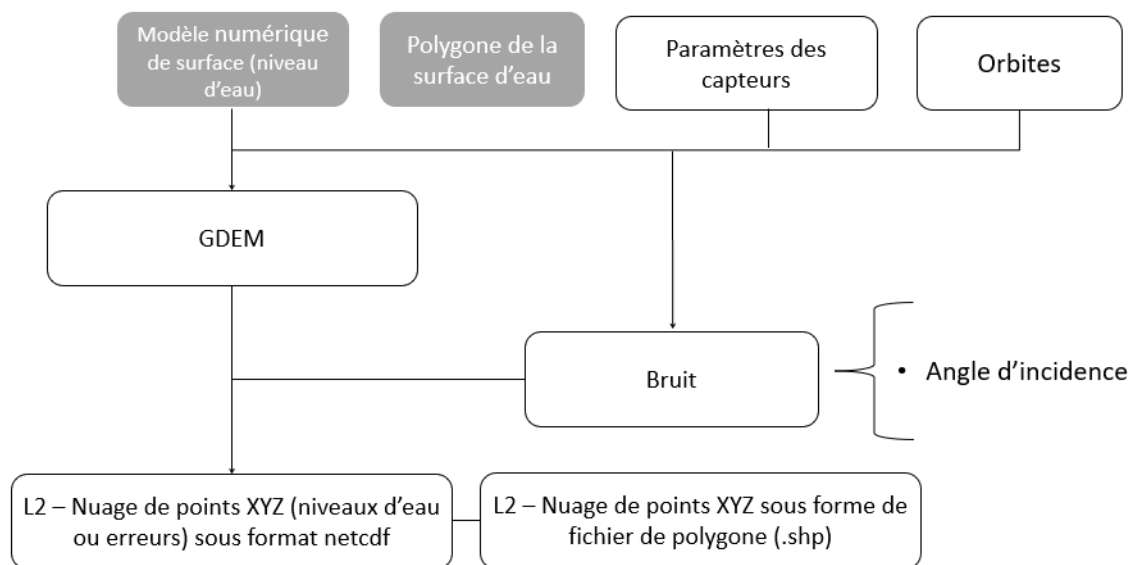


Figure 4-2 Schéma des principales composantes du simulateur SWOT-LS

## 4.2 Modélisation du réservoir Eastmain-1 avec SWOT-HR et SWOT-LS

Dans la présente section, les intrants utilisés pour produire des images synthétiques SWOT sont présentés à la section 4.2.1. Par la suite, une classification des pixels d'une image synthétique SWOT est réalisée à l'aide de SWOT-HR pour une date spécifique et des images synthétiques SWOT produites avec SWOT-LS sur une durée d'environ 5 mois sont présentées à la section 4.3.2 pour le réservoir Eastmain-1. Étant donné la taille du réservoir, l'ensemble des images ne couvre que partiellement le réservoir. Ce faisant, une méthodologie simple est suggérée pour compléter les images SWOT à couverture partielle. Enfin, une comparaison du bilan hydrique est effectuée entre les images synthétiques SWOT et la modélisation hydrodynamique.

### 4.2.1 Intrants aux simulateurs SWOT-HR et SWOT-LS

Les simulateurs SWOT-HR et SWOT-LS requièrent un modèle numérique de surface (MNS) afin de générer des images synthétiques SWOT de niveau d'eau. Dans le cas de SWOT-HR, un MNT fixe et une grille de hauteurs d'eau associée à un pas de temps peuvent être fournis séparément puisque leur somme correspond à un MNS. Dans le cas de SWOT-LS, un MNS doit être fourni pour chaque pas de temps. Ces intrants proviennent du MNT de la bathymétrie ainsi que des grilles de hauteur d'eau



produite au cours de la modélisation hydrodynamique transitoire 3D réalisée au chapitre 3. Afin de tenir compte des changements intra journaliers du niveau d'Eastmain-1, ces grilles ont été agrégées à un pas de temps horaire. Ainsi, une image synthétique SWOT est espacée au maximum d'une heure avec la simulation hydrodynamique. Ce choix a été fait afin de minimiser les erreurs causées par la résolution temporelle. Par ailleurs, un fichier de forme (shapefile), dont la forme est montrée à la figure 4-3, a également été fourni à SWOT-LS afin de délimiter le réservoir d'Eastmain-1.

À chaque cycle de 21 jours, 4 passages capturent en partie le réservoir Eastmain-1. Ces passages sont : 0119, 0298, 0425 et 0576 parmi un total de 584 passages par cycle sur le globe. Leur couverture de la superficie du réservoir est respectivement de 50, 12, 96 et 51 %, ce qui correspond respectivement à des superficies couvertes d'environ 301, 72, 579 et 308 km<sup>2</sup> au niveau maximum d'exploitation de 283,71 m.

À la figure 4-6, il est possible de voir le nadir en rouge et les portées minimales et maximales en bleu.

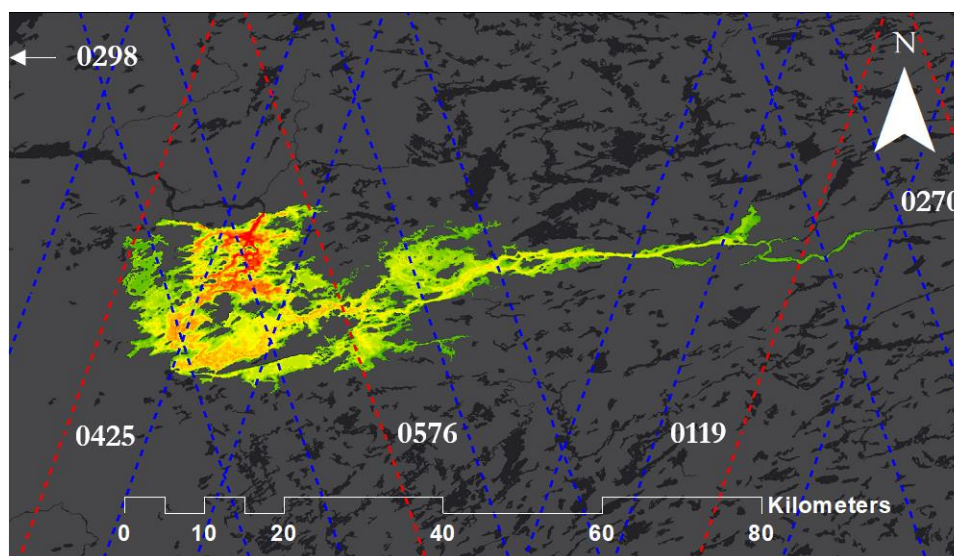


Figure 4-3 Passages de SWOT sur le domaine du réservoir Eastmain-1, représenté ici par sa bathymétrie

#### 4.2.2 Image SWOT-HR : classification du terrain

Pour faire une classification du terrain, il est requis d'utiliser le simulateur SWOT-HR. La figure 4-4 présente la classification des pixels selon les types de terrain définis à la section 4.1.1.1 pour le premier passage de SWOT de la simulation (cycle 001), soit le passage 0119 réalisé le 05 mai 2015 vers 05h10.

Pour ce passage, le satellite est en direction ascendante au sud-est d'Eastmain-1 et la fauchée gauche de 60 km de large capture une partie de l'état du réservoir.

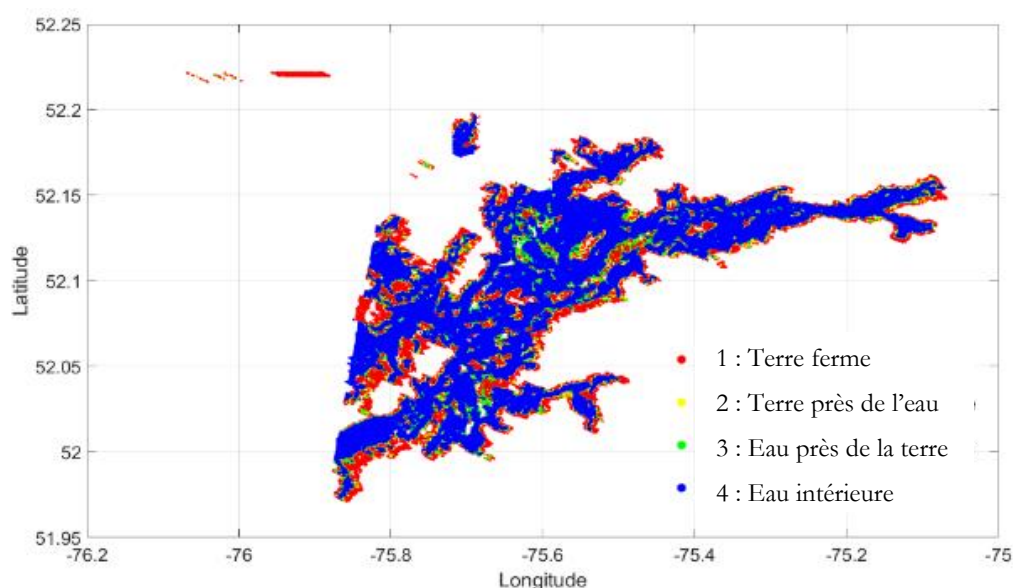


Figure 4-4 Comparaison de la classification de SWOT pour le passage 0119

Contrairement aux rivières, le signal dans les grands lacs et réservoirs est généralement moins contaminé par la présence de berges, bien que la présence d'îles puisse contaminer le signal en berges de celles-ci. Afin d'évaluer le potentiel de contamination dans un grand réservoir tel que Eastmain-1, la classification réalisée par le simulateur SWOT-HR de l'ensemble des pixels qui auraient dû être considérés comme du sol (« Terre ferme » ou « Terre près de l'eau ») est extraite. Ces pixels sont regroupés à l'histogramme de la figure 4-5. Ainsi, les pixels classifiés comme « Terre ferme » et « Terre près de l'eau » sont considérés comme correctement classifiés alors que ceux classifiés comme « Eau près de la terre » ou « Eau intérieure » le sont à tort. En effet, les pixels incorrectement classifiés comme de l'eau seront malgré tout intégrés dans le calcul du niveau de l'eau, ce qui peut biaiser l'estimation du niveau d'eau du réservoir.

À la figure 4-5, il est montré que 88% des pixels de sol (84 % « Terre ferme » et 4 % « Terre près de l'eau ») sont correctement classifiés par rapport à 12 % des pixels d'eau (3 % « Eau près de la terre » et 9 % « Eau intérieure ») qui ne le sont pas.

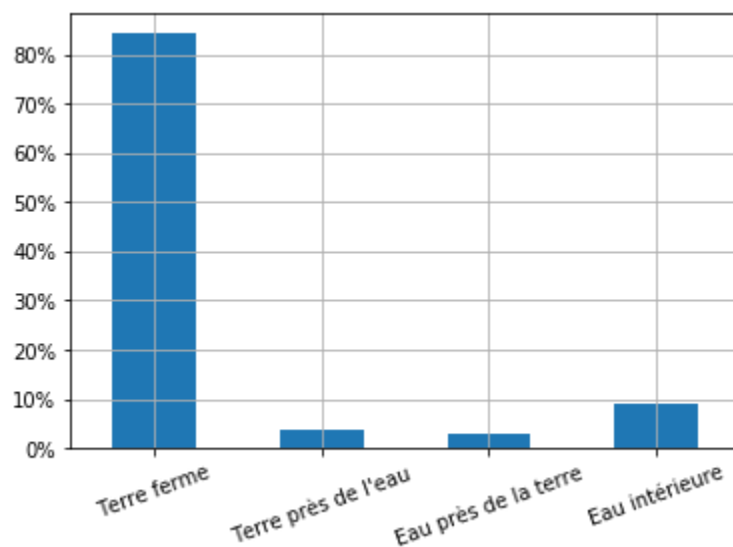


Figure 4-5 Classification du simulateur SWOT-HR pour le passage 0119 pour les pixels qui auraient dû être considérés comme du sol

Ce faisant, l'estimation de la contamination au réservoir Eastmain-1 implique qu'il faut être prudent avec certains pixels des images SWOT synthétiques. Dans le cas d'Eastmain-1, la topographie n'est pas très accidentée en périphérie du réservoir, ce qui limite le risque de valeurs aberrantes. Toutefois, pour d'autres domaines, les erreurs de classification pourraient être très importantes et du post-traitement pourrait alors être requis (par exemple : application de masque). Ainsi, les erreurs de classification de SWOT sont considérées acceptables pour le cas du réservoir Eastmain-1 et l'hypothèse d'une classification idéale des pixels posée par SWOT-LS est également jugée acceptable pour ce réservoir.

### 4.2.3 Image SWOT-LS : niveau d'eau

Les images synthétiques SWOT ont été générées à partir de SWOT-LS pour la période du 01 mai jusqu'au 30 septembre 2015. Les figures 4-6 à 4-9 présentent l'erreur des images de nuage de pixels SWOT respectivement pour les quatre passages 0119, 0298, 0425 et 0576 du premier cycle. Dans ce contexte, l'erreur est la différence entre la simulation hydrodynamique (vérité) et l'image SWOT synthétique. Bien que certains pixels aient originalement des écarts allant jusqu'à plus de 20 mètres d'erreur, le traitement multivisé réduit cette erreur en appliquant une moyenne sur un ensemble de pixels à proximité, tel que présenté ci-dessous.

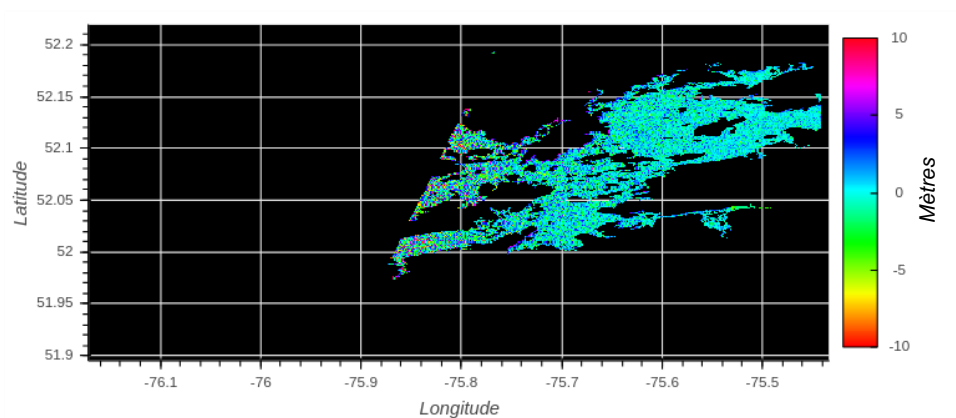


Figure 4-6 Orbite 0119 du cycle 0001 le 05 mai 2015 05h00

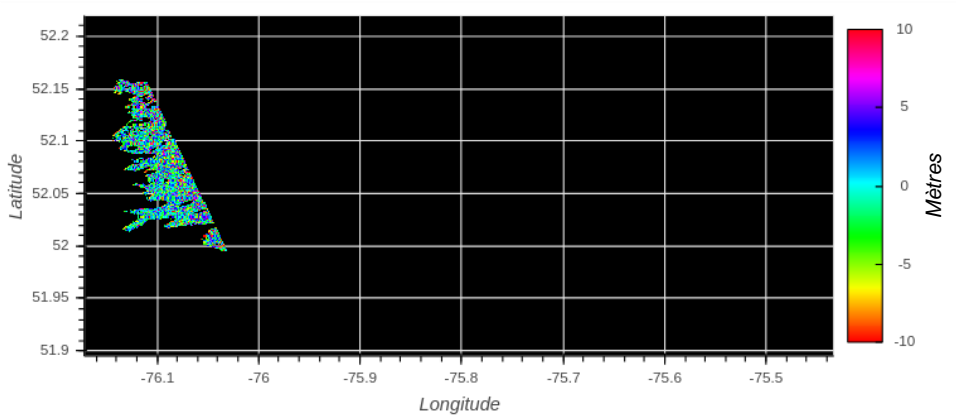


Figure 4-7 Orbite 0298 du cycle 0001 le 11 mai 2015 14h00

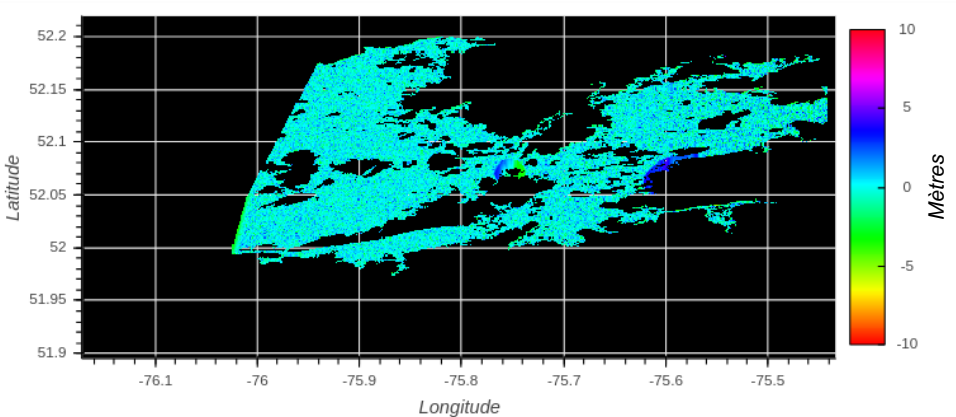


Figure 4-8 Orbite 0425 du cycle 0001 le 16 mai 2015 04h00

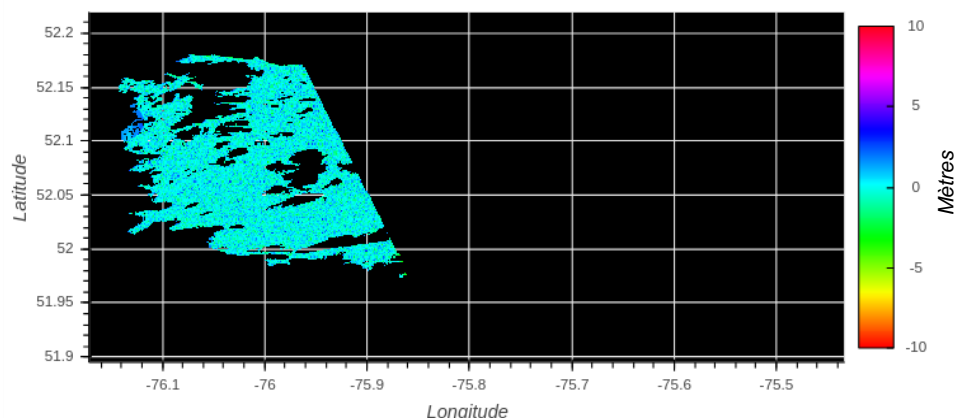


Figure 4-9 Orbite 0576 du cycle 0001 le 21 mai 2015 13h00

La figure 4-10 présente l'évolution de l'erreur moyenne du niveau du réservoir entre l'image SWOT et la simulation hydrodynamique (vérité) pour les pixels qui sont juxtaposés. Tous les points sur les courbes sont espacés de 21 jours, correspondant à la période où le satellite revient prendre une image d'une même région.

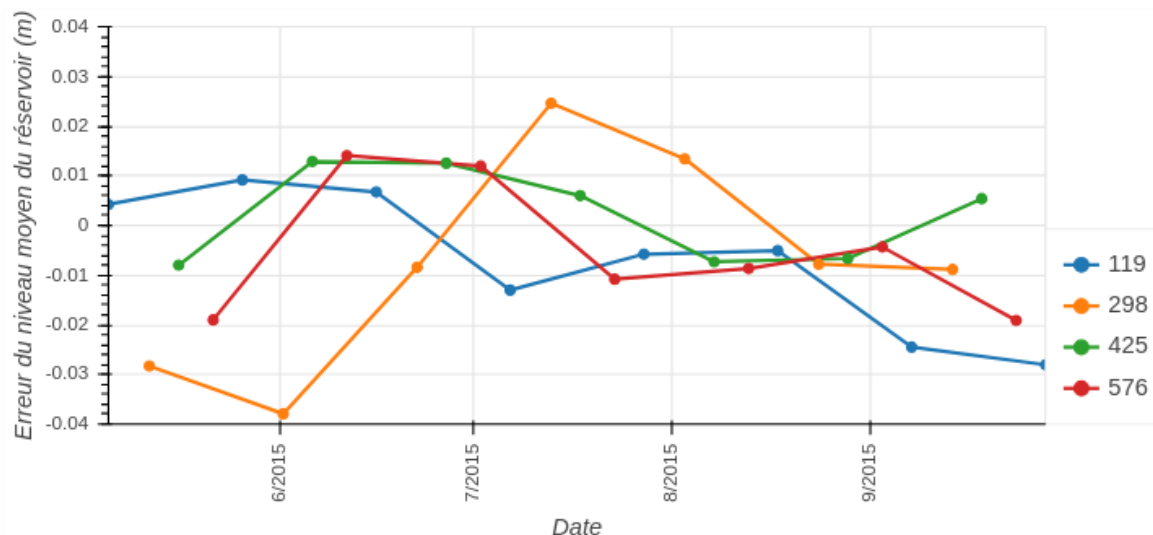


Figure 4-10 Évolution de l'erreur moyenne du niveau au réservoir (m) en fonction de l'orbite SWOT

Les passages 0119, 0298, 0425 et 0576 affichent une précision altimétrique moyenne absolue de 0,01, 0,02, 0,01 et 0,01 m. La précision altimétrique la plus élevée obtenue pour la période simulée est respectivement d'environ 0,028, 0,038, 0,013 et 0,015 m pour chaque passage. À l'inverse, la précision la plus faible est de respectivement 0,004, 0,007, 0,005 et 0,004 m. Cette performance est conforme aux attentes du satellite SWOT, notamment par rapport à la précision altimétrique attendue inférieure à 10 cm pour des pixels dont la superficie est supérieure à 1,0 km<sup>2</sup>. L'erreur moyenne du niveau du

réservoir entre l'image SWOT synthétique et le niveau moyen complet du réservoir (vérité) a également été calculée. Les résultats sont très similaires à la figure 4-11 et les différences sont abordées à la section 4.3.4. Lorsque les niveaux d'eau varient spatialement dans un réservoir, l'image SWOT synthétique dont la couverture n'est que partielle peut ne pas être tout à fait représentative du niveau moyen du réservoir. Ainsi, la prochaine section tente d'explorer une approche pour compléter les images SWOT à couverture partielle afin d'évaluer s'il y a possibilité d'améliorer la précision altimétrique sur l'ensemble du réservoir.

#### 4.2.4 Correction pour la couverture partielle

La plupart des études ayant utilisé le simulateur SWOT ont été pour des applications en rivières [Biancamaria et al., 2016]. Le simulateur a comparativement été moins étudié pour des applications sur des lacs ou des réservoirs. Plus encore, la section précédente a présenté les images SWOT synthétiques sur le réservoir Eastmain-1 qui ne couvrent que partiellement le réservoir. Il est possible de concevoir des circonstances où le plan d'eau peut être incliné (causé par des effets de vent ou la topographie, par exemple), ce qui affecterait l'erreur lorsque les images SWOT ne couvrent qu'une partie du réservoir. Il est proposé ici d'évaluer le potentiel de l'apprentissage supervisé pour prédire les niveaux de l'ensemble d'un réservoir à partir d'images SWOT ayant une couverture partielle. L'utilisation de l'apprentissage supervisé implique que l'on possède un historique ou une connaissance des corrélations croisées des niveaux d'eau en différents endroits du bassin. Dans la pratique, ce genre d'information est difficile à acquérir. Ainsi, une solution proposée consiste à créer cet historique à l'aide d'un modèle hydrodynamique.

Pour ce faire, la modélisation hydrodynamique 3D du chapitre 3 est reprise ici. La moyenne des niveaux d'eau des pixels de la modélisation hydrodynamique contenue sous l'image SWOT à une orbite  $P$  est corrélée avec la moyenne de l'ensemble de pixels du réservoir. Ainsi, une équation de la forme de l'équation 4-12 est définie pour chaque orbite  $P$ .

$$\mathbf{Y} = \beta \mathbf{X}^P \quad (4-12)$$

Où  $\mathbf{X}^P$  est un vecteur dont chaque élément  $x_t^P$  représente le niveau d'eau moyen des pixels contenus sous une image SWOT à un pas de temps  $t$ .  $\mathbf{Y}$  est un vecteur dont chaque élément  $y_t$  représente le

niveau d'eau moyen des pixels du réservoir à un pas de temps  $t$ .  $\beta$  est un vecteur de paramètres qui est ajusté à l'aide de la méthode des moindres carrés.

La taille de chaque vecteur correspond au nombre de pas de temps qui sont disponibles. Étant donné que le réservoir a un volume important et que celui-ci ne varie pas énormément au pas de temps horaire, le pas de temps journalier a été choisi. Ce faisant, cela correspond à 152 observations de la « vérité » calculées avec la modélisation hydrodynamique 3D présentée au chapitre 3. L'hypothèse sous-jacente à cette approche est qu'il est fort probable que les niveaux actuels du réservoir aient été observés par le passé. Ainsi, cette approche consiste simplement à tirer profit des corrélations croisées qui existent entre les pixels du réservoir afin de prédire une estimation probable de l'élévation des pixels non couverts par SWOT au moment d'une acquisition. À la figure 4-11, des images SWOT synthétiques à couverture partielle (à gauche) sont complétées à l'aide du modèle d'apprentissage supervisé de l'équation 4-12 (à droite). En effet, chaque image SWOT pour une orbite donnée est transformée du format de nuage de points vers le vecteur  $\mathbf{X}^P$ , ce qui permet d'appliquer le modèle.

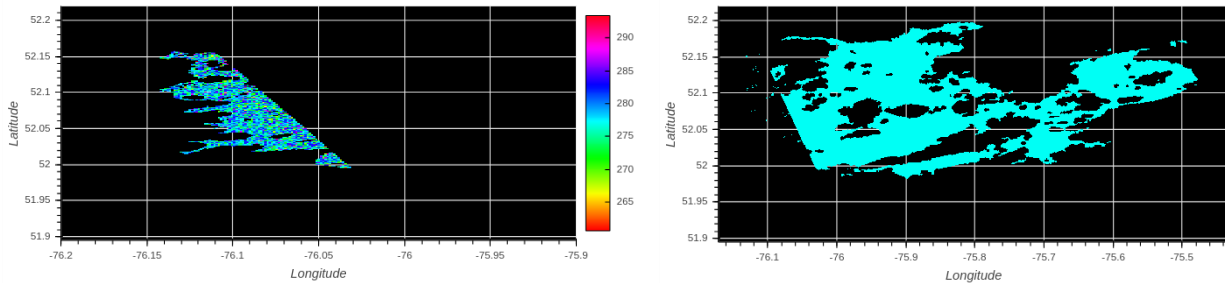


Figure 4-11 image SWOT à couverture partielle (cycle 0001 – orbite 298) (à gauche) et résultats du modèle d'apprentissage supervisé de l'équation 4-12 (à droite)

Le tableau 4-2 résume l'application de cette méthode pour 7 cycles SWOT et ce, pour chacune des 4 orbites suivantes : 0119, 0298, 0425, 0576. Les niveaux moyens du réservoir prédits par cette méthode sont également comparés aux niveaux réels théoriques (vérité) ainsi qu'aux niveaux moyens de l'image SWOT synthétique seule. Les niveaux moyens prédits correspondent au niveau estimé par le modèle prédictif sur l'ensemble du réservoir. Le niveau moyen SWOT correspond au niveau moyen de l'image SWOT et n'est donc pas défini sur l'entièreté du domaine. Enfin, le niveau moyen réel correspond au niveau de l'ensemble du réservoir qui a été déterminé à l'aide du modèle hydrodynamique 3D (vérité).

Tableau 4-1 Comparaison des niveaux d'eau moyens pour chaque cycle et orbite SWOT sur le réservoir Eastmain-1

	Niveau moyen prédit (m)	Niveau moyen SWOT (m)	Niveau moyen vérité (m)	Erreur absolue (m) - Prédiction	Erreur absolue (m) - Image partielle SWOT
<i>Orbite 0119 (50 % de couverture du réservoir)</i>					
Cycle					
1	276,079	276,082	276,071	0,007	0,011
2	280,627	280,630	280,618	0,008	0,012
3	281,767	281,769	281,759	0,007	0,010
4	282,162	282,164	282,172	-0,010	-0,008
5	282,725	282,727	282,727	-0,003	0,000
6	282,328	282,330	282,329	-0,001	0,001
7	282,427	282,429	282,448	-0,021	-0,019
Biais (m)				-0,001	0,001
Erreur quadratique moyenne (m)				0,0102	0,0105
<i>Orbite 0298 (12 % de couverture du réservoir)</i>					
Cycle					
1	278,185	278,182	278,208	-0,023	-0,026
2	281,435	281,433	281,474	-0,038	-0,041
3	281,660	281,657	281,666	-0,007	-0,009
4	282,301	282,299	282,273	0,027	0,026
5	282,906	282,905	282,891	0,015	0,014
6	282,163	282,161	282,172	-0,009	-0,011
7	282,860	282,858	282,868	-0,008	-0,010
Biais (m)				-0,006	-0,008
Erreur quadratique moyenne (m)				0,0209	0,0227
<i>Orbite 0425 (96 % de couverture du réservoir)</i>					
Cycle					
1	279,263	279,264	279,271	-0,008	-0,007
2	281,669	281,670	281,656	0,013	0,014
3	281,673	281,673	281,661	0,012	0,012
4	282,317	282,317	282,311	0,005	0,006
5	282,683	282,683	282,691	-0,008	-0,008
6	282,282	282,283	282,289	-0,007	-0,006
7	282,901	282,901	282,895	0,006	0,006
Biais (m)				0,002	0,002
Erreur quadratique moyenne (m)				0,0089	0,0084
<i>Orbite 0576 (51 % de couverture du réservoir)</i>					
Cycle					
1	280,008	280,006	280,027	-0,019	-0,021
2	281,797	281,796	281,782	0,015	0,014
3	281,892	281,891	281,879	0,013	0,012
4	282,472	282,470	282,482	-0,010	-0,012
5	282,474	282,472	282,482	-0,008	-0,010
6	282,387	282,385	282,391	-0,005	-0,006
7	282,750	282,748	282,772	-0,023	-0,024
Biais (m)				-0,005	-0,007
Erreur quadratique moyenne (m)				0,0002	0,0002



L'application de la méthode de prédiction réduit ou conserve les biais, lesquels sont calculés sur l'ensemble des 7 cycles et 4 orbites. L'erreur quadratique moyenne est minimalement influencée entre les scénarios appliquant le modèle de prédiction et celui avec seulement les images SWOT. Le gain est plus marqué au niveau de l'orbite 0298, laquelle ne couvre que 12% de la superficie du réservoir. En effet, pour ce cas de figure, le biais est réduit de 25 % et l'erreur quadratique moyenne de 8 %. Ainsi, utiliser une méthode de prédiction pour compléter les images SWOT au réservoir Eastmain-1 est une approche utile qui mérite d'être explorée davantage, notamment lorsque des jeux de données SWOT plus longs seront disponibles. Toutefois, le gain n'est pas aussi important pour les cas où l'image couvre déjà une superficie significative du réservoir (ex : orbite 0425 qui en couvre 96 %). Dans ces conditions, le niveau d'eau moyen estimé par l'image SWOT est très similaire à celui du réservoir au complet et en fait donc une bonne approximation. Dans tous les cas, l'utilisation du modèle de prédiction permet de compléter l'estimation du niveau sur l'ensemble du réservoir, ce qui est requis afin de calculer le volume sur l'ensemble du réservoir.

Il est également pertinent de rappeler que la pente du réservoir Eastmain-1 est plutôt faible et qu'une approximation aussi bonne des images SWOT ne serait pas nécessairement applicable sur certains autres réservoirs. Également, la période simulée ne semble pas avoir reçu un vent très fort. Dans un contexte de vent fort (tempête, ouragan, etc.), la pente du réservoir aurait pu être plus importante. Dans ces circonstances, un modèle prédictif pourrait être plus performant.

#### **4.2.5 Évaluation du niveau et du volume d'eau**

L'utilisation de SWOT pour faire le suivi du bilan hydrique peut offrir des compléments d'information dans les lacs et réservoirs jaugés en plus de s'avérer une source d'information cruciale pour les domaines non jaugés.

La figure 4-12 présente l'écart entre le niveau moyen estimé par les images SWOT par rapport au niveau d'eau théorique (vérité) respectivement sur le réservoir complet et sur la couverture partielle (pixels juxtaposés avec l'image SWOT). Pour le scénario avec le réservoir au complet, l'erreur cumulative est également présentée. Celle-ci représente l'erreur cumulative de l'estimation du niveau moyen qui atteint environ -10 cm après 5 mois de simulation, ce qui correspond à environ -3 mm par image SWOT synthétique. L'erreur quadratique moyenne est de 1,5 cm. Ce résultat est très similaire

pour le cas à couverture partielle, puisque l'erreur moyenne entre les deux scénarios n'est que de 1 mm.

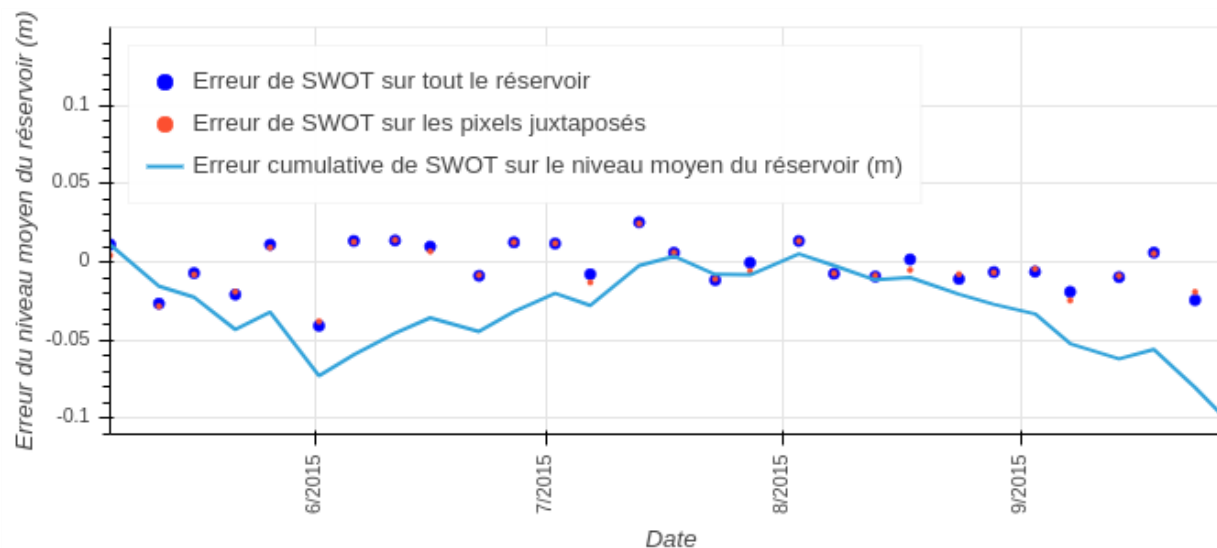


Figure 4-12 Comparaison de l'écart d'images SWOT et la simulation théorique (vérité)

L'erreur d'estimation des niveaux déterminée à la figure 4-12 est cohérente avec les résultats de Bonnema et Hossain [2019]. En effet, ceux-ci évaluent une erreur quadratique moyenne de 0,3 à 9,8 cm sur un ensemble de 17 réservoirs.

À partir du niveau d'eau sur l'ensemble du réservoir Eastmain-1, il est possible d'évaluer un volume d'emménagement. Une courbe niveau-emmagasinement définie par Hydro-Québec est utilisée pour définir le volume de stockage. Cette courbe relative définit le stockage à 0 hm<sup>3</sup> au niveau minimal d'exploitation qui est de 274,11 m. Il est approprié d'utiliser une courbe relative à un seuil pour plusieurs raisons, notamment :

1. Zone d'eau morte : À moins de situations exceptionnelles, le niveau d'eau n'atteint pas de valeurs sous le niveau minimal d'exploitation.
2. Bathymétrie : La bathymétrie du fond d'un réservoir est difficile à évaluer (Eastmain-1 étant l'exception plutôt que la règle). Toutefois, il est possible par télédétection de définir des courbes niveau-emmagasinement pour la plage de variation naturelle ou régularisée des niveaux d'un lac ou réservoir.

À la figure 4-13, le volume d'eau est estimé à partir de deux sources : par le niveau d'eau moyen prédit sur l'ensemble du réservoir par les images SWOT synthétiques ainsi que par le niveau d'eau moyen réel, soit celui mesuré et validé par Hydro-Québec pour l'année 2015. Notons que malgré le temps entre deux passages de SWOT qui varie de 5 à 6 jours sur le domaine d'étude, l'analyse de la figure 4-12 montre qu'une interpolation linéaire entre les volumes estimés par les images SWOT synthétiques permettrait d'approximer raisonnablement les volumes entre deux passages du satellite.

La figure 4-14 présente la différence entre le volume réel calculé par Hydro-Québec et le volume estimé à partir des images SWOT synthétiques prédites sur l'ensemble du réservoir au moment de l'acquisition de celles-ci.

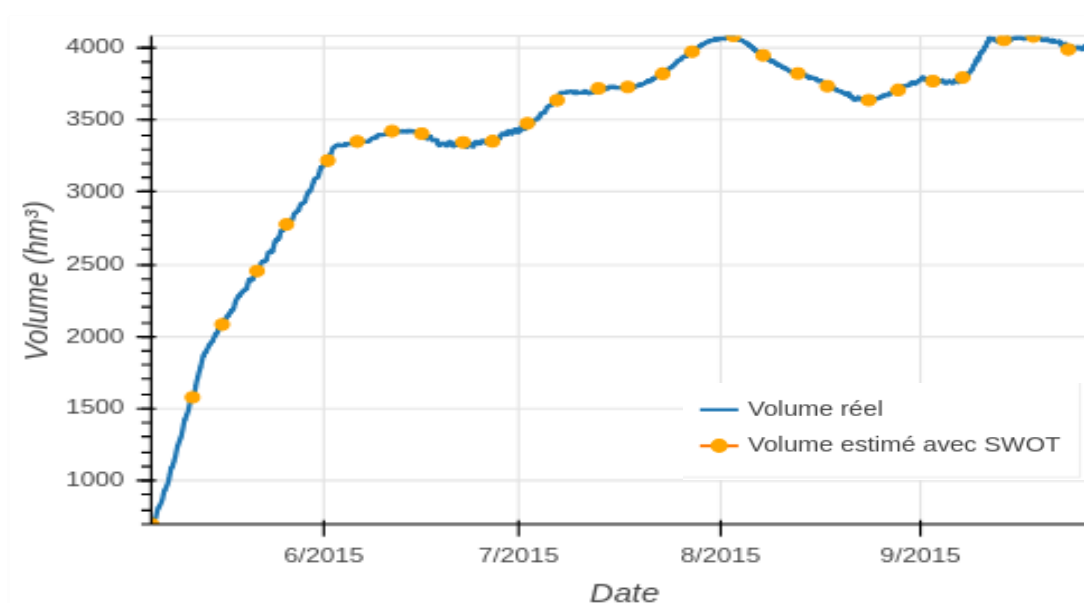


Figure 4-13 Volume d'eau réel (calculé par Hydro-Québec) et estimé par les images SWOT synthétiques prédites sur l'ensemble du réservoir Eastmain-1

Il est important de rappeler qu'une relation niveau-emmagasinement est déjà existante pour le réservoir d'Eastmain-1 et est calculée par Hydro-Québec. Dans les circonstances où une courbe est désuète ou non existante (non jaugé), le recours aux images SWOT pour évaluer cette courbe est envisageable et a été démontré par Bonnema et Hossain [2019] (voir la section 2.3).

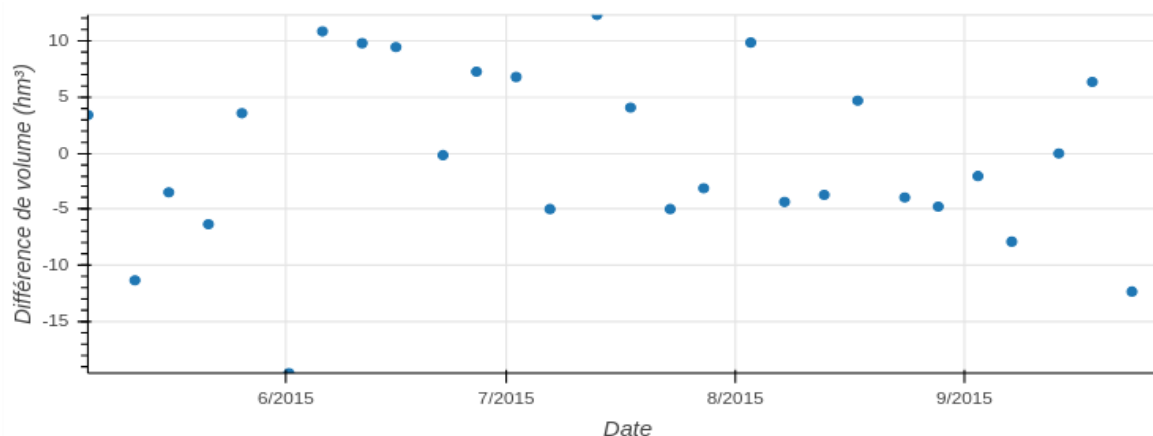


Figure 4-14 Différence du volume d'eau réel (calculé par Hydro-Québec) et estimé par les images SWOT synthétiques prédites sur l'ensemble du réservoir Eastmain-1 lors de l'acquisition des images SWOT synthétiques

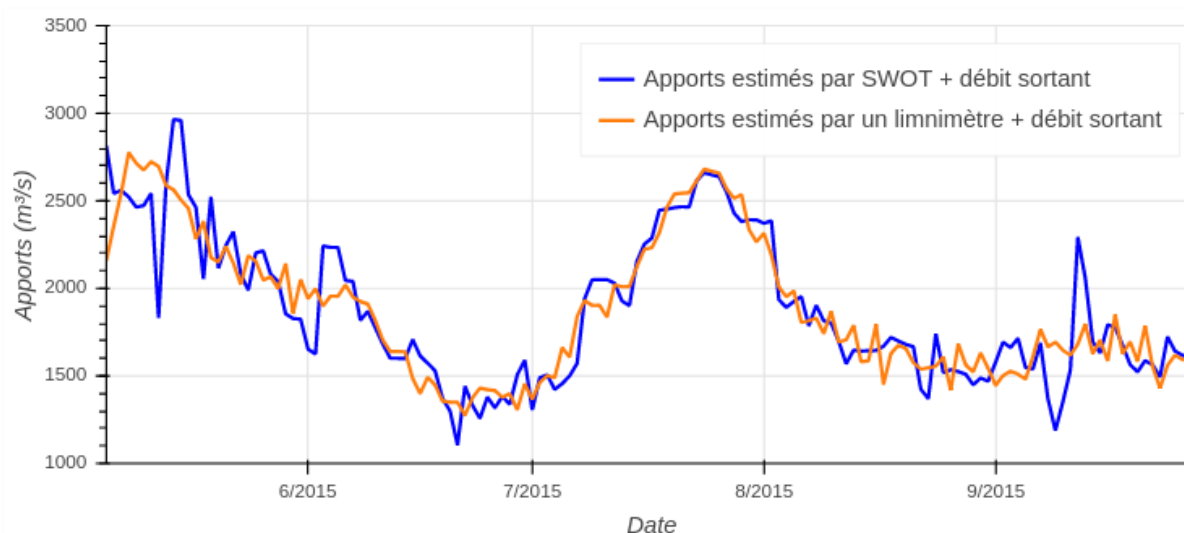
Pour le réservoir Eastmain-1, il semble donc que les images SWOT soient suffisantes à elle seules pour bien approximer le volume d'eau du réservoir, incluant entre les acquisitions des images (par interpolation).

Étant donné que la mission SWOT répond d'abord à un besoin de recherche, il n'est pas encore certain que d'autres missions opérationnelles auront lieu dans les années subséquentes. Ce faisant, s'il est admis que SWOT peut bien estimer et représenter les volumes d'eau des grands réservoirs comme Eastmain-1, ceci implique qu'il existe une opportunité de tenter de corréler ces niveaux et leur variation entre les images SWOT avec des variables exogènes tels que les températures, les précipitations, les niveaux aux stations limnimétriques (lorsque disponible), la période de l'année ou encore les données d'autres satellites comme Sentinel-3. Ce faisant, la banque d'information sur la spatialisation des niveaux qui sera acquise au cours de la mission SWOT représente une opportunité de servir de référence pour la modélisation des niveaux spatialisés à la fois pendant et après la mission.

#### 4.2.6 Reconstitution des apports par bilan hydrique

À partir de l'équation du bilan hydrique (2-1), il est possible d'estimer les apports naturels au bassin versant d'Eastmain-1. La figure 4-15 compare l'apport estimé par les images SWOT synthétiques prédites sur l'ensemble du réservoir avec l'apport calculé par bilan hydrique d'Hydro-Québec. Notons que l'apport total calculé (incluant le débit provenant de la dérivation de la rivière Rupert) par Hydro-Québec présenté dans cette figure est brut et n'a pas subi de filtrage. Les apports calculés par les

images SWOT et le bilan hydrique d'Hydro-Québec ont utilisé les mêmes sources de données pour définir le débit sortant, soit le débit évacué et turbiné par les ouvrages Eastmain-1 et Eastmain-1A. Dans l'ensemble, il y a une bonne adéquation entre les bilans hydriques calculés par les deux méthodes. Ceci démontre que l'estimation des apports à partir d'images SWOT et de données de débits sortants pourrait être suffisante dans un contexte de grands réservoirs pour estimer les apports au bassin versant.



4-15 Apports calculés à partir des images SWOT et du bilan hydrique réalisé par Hydro-Québec

Il est important de considérer que pour le cas d'Eastmain-1, les apports calculés par bilan hydrique sont considérés de bonne qualité. Or, ceci n'est pas la norme. Pour la plupart des réservoirs opérés par Hydro-Québec, les apports obtenus par bilan hydrique sont beaucoup plus bruités, généralement causés par une estimation spatialement non représentative des niveaux au réservoir ou des fluctuations des niveaux d'eau enregistrées par le ou les limnimètres à cause du vent et des opérations de gestion (par exemple : ouverture de l'évacuateur de crues), ce qui cause beaucoup de bruit dans l'estimation du volume. Dans ce contexte, de la même manière que le volume d'eau et les apports ont été bien estimés à partir d'images SWOT synthétiques, il est fort probable que ces résultats soient reproductibles dans d'autres bassins contenant de grands lacs ou réservoirs dont l'estimation du volume à l'aide de limnimètres soit de qualité inférieure à Eastmain-1. Ainsi, il serait important de

poursuivre la recherche afin d'évaluer comment SWOT permettrait d'améliorer la qualité du bilan hydrique dans des bassins versants dont l'apport est considéré de mauvaise qualité.

Ainsi, les résultats présentés ci-dessus montrent la précision avec laquelle le bilan hydrique peut être estimé grâce au satellite SWOT. En effet, tel que mentionné par Solander et al. [2016], l'objectif de précision altimétrique en deçà de 10 cm est applicable pour des surfaces d'eau d'environ 1 km<sup>2</sup> et plus. Toutefois, pour de grands réservoirs comme Eastmain-1, il est attendu que la précision altimétrique sera de meilleure qualité, notamment en raison de la plus grande quantité de points de mesure qui sont disponibles pour appliquer des opérations de calculs de moyenne.

Ces résultats sont globalement satisfaisants en ce sens où la précision altimétrique simulée est en adéquation avec les critères attendue pour la mission SWOT [Biancamaria et al., 2016]. Il sera pertinent d'étudier la performance de SWOT pour l'estimation du bilan hydrique sur d'autres réservoirs afin d'évaluer si des biais sont en prévoir dans des régions spécifiques. Également, des simulations sur de plus longues périodes de temps (multiannuel) permettraient de conclure si la fermeture du bilan hydrique est maintenue sur de longues périodes (années).

## CHAPITRE 5 CONCLUSION

La télédétection pour le suivi des niveaux d'eau a été étudiée maintes fois depuis plusieurs décennies. Les premières applications, utilisant des altimètres radar comme Topex/Poseidon ou ERS1/2, étaient prévues d'abord et avant tout pour des applications océanographiques. Toutefois, de nombreuses études ont tenté d'utiliser ces satellites pour le suivi des niveaux d'eau continentaux [Birkett, 2002; Dettmering et al., 2016; Hwang et al., 2016] et le LEGOS ont compilé les données d'un ensemble de ces altimètres afin de faire le suivi de grands plans d'eau de 150 lacs [Créaux et al., 2011].

Il demeure que le suivi de niveaux d'eau pour l'hydrologie continentale est limité par la faible résolution spatiale des altimètres conventionnels. De nouveaux satellites, tel que Sentinel-3 (lancé en 2016) et SWOT (lancement prévu en 2021) pourraient possiblement en améliorer le suivi. En se basant sur les critères de performance visés pour la mission SWOT, Biancamaria et al. [2010] ont estimé que SWOT serait en mesure de faire le suivi de plus de 68% des lacs et réservoirs sur le globe comparativement à seulement 15% avec la technologie actuelle.

Une meilleure connaissance des niveaux d'eau et par conséquent, des apports calculés par bilan hydrique, permettrait d'optimiser la gestion de la ressource hydrique pour les opérateurs de barrages. En particulier, la prévision hydrométéorologique chez Hydro-Québec est hautement affectée par le bruit dans l'estimation de ses apports, lequel est majoritairement causé par les fluctuations des niveaux de ses limnimètres ou par le manque de représentativité des limnimètres à l'échelle des grands réservoirs. Dans ce travail, il a été question de déterminer comment le satellite SWOT pourrait permettre d'améliorer l'estimation des niveaux d'eau des réservoirs et des lacs naturels jaugés et non jaugés, de même que d'évaluer s'il était possible d'améliorer la qualité des apports par bilan hydrique.

Dans le cadre de cette recherche, le réservoir Eastmain-1 a été choisi comme site d'étude, étant donné l'importance économique que revêt le système hydrique de La Grande Rivière pour Hydro-Québec, de même que pour le nombre de données de qualité disponibles à ce site.

Trois sections composent ce mémoire, à savoir : une modélisation hydrodynamique du réservoir Eastmain-1, la génération et l'évaluation d'images du satellite SWOT à l'aide d'un simulateur et des

expérimentations de l'assimilation de données satellitaires dans un modèle hydrodynamique suivant plusieurs scénarios et contraintes.

Une modélisation hydrodynamique du modèle Eastmain-1 a été réalisée, d'abord en 2D, à l'aide du modèle TELEMAC. Plusieurs conditions limites ont été explorées et compte tenu de la régularisation du réservoir, un débit et un niveau ont été contraints aux deux sorties du réservoir, à savoir aux aménagements Eastmain-1A et Eastmain-1. La condition entrante du modèle n'est contrainte que par un débit. Il a également été démontré que pour un réservoir de la taille d'Eastmain-1, le paramètre de frottement de Manning est négligeable pour l'évaluation des niveaux d'eau. La simulation non permanente en 2D pour la série historique d'Eastmain-1 du 01 mai au 30 septembre 2015 a généralement été satisfaisante, mais des instabilités dans la génération des niveaux d'eau à certaines dates ont été rencontrées. Dans ce contexte et afin de mieux prendre en compte l'effet du vent, une modélisation hydrodynamique 3D a été considérée. Celle-ci n'a d'ailleurs pas rencontré de problèmes d'instabilité et a donc été choisie comme modélisation finale du réservoir. Enfin, pour valider la capacité du modèle à reproduire la réalité, les débits simulés et observés aux frontières ont été comparés et validés. Pour la série historique simulée d'Eastmain-1 en 2015, un coefficient de corrélation de Pearson d'environ 80% a été déterminé entre l'écart-type de la distribution des niveaux d'eau aux nœuds du modèle et la dérivée première du niveau d'eau par rapport au temps. Ceci implique que bien que la pente du plan d'eau d'Eastmain-1 soit généralement reconnue comme très faible, celle-ci est plus importante lorsque le réservoir se remplit rapidement, notamment lors de la crue printanière.

Comme le satellite SWOT n'est pas encore en orbite, des simulateurs d'images SWOT synthétiques ont été développés : SWOT-HR par JPL et SWOT-LS par le CNES pour des applications sur de grands domaines. Le simulateur SWOT-HR a d'abord été utilisé afin d'estimer les erreurs de classification sur le domaine d'Eastmain-1. Par la suite, SWOT-LS a utilisé les niveaux d'eau de surface calculés par la modélisation hydrodynamique 3D comme intrants et par une succession d'opérations (présentées au chapitre 4), des nuages de points (*pixel cloud*) contenant des niveaux d'eau avec l'incertitude attendue du satellite ont été produits. Pour le cas d'Eastmain-1, à chaque cycle de 21 jours, le satellite SWOT fait un total de 4 passages avec une couverture partielle du réservoir. Au total, 7 cycles ont été générés, ce qui a produit 28 images SWOT synthétiques. Étant donné que les images du satellite SWOT ne couvrent pas entièrement le réservoir, un modèle a été constitué afin de prédire le



niveau d'eau moyen pour la partie non observé du réservoir. Une validation des images SWOT synthétiques et des niveaux provenant du modèle prédictif a été réalisée avec les niveaux d'eau générés par la modélisation hydrodynamique, laquelle est considérée comme la « vérité ». Après environ 5 mois de simulation, le déficit cumulatif de niveau d'eau est de -10 cm, ce qui est équivalent à un biais d'environ -3 mm par image SWOT par rapport au niveau d'eau « vérité ». L'erreur quadratique moyenne est estimée à environ 1,5 cm. Une estimation du volume d'eau et des apports calculés par bilan hydrique à partir des images SWOT synthétiques a également été réalisée. Celles-ci ont été comparées aux données observées appartenant à Hydro-Québec. Les volumes et apports estimés à partir de SWOT sont globalement en adéquation avec les données observées.

Certaines limitations en lien avec le présent travail doivent être considérées. D'abord, il convient de rappeler que les images SWOT générées dans le présent mémoire sont synthétiques. Ce faisant, des simplifications supposées par les simulateurs SWOT-HR et SWOT-LS impliquent que des erreurs peuvent avoir été omises. En effet, dans les configurations actuelles des deux simulateurs, certaines erreurs systématiques notamment celles causées par la traversée de l'atmosphère ne sont pas bien considérées. Également, la présence de précipitations lors de l'acquisition de signal pourrait contaminer le signal et son impact n'est encore que peu étudié [Bonnema et Hossain, 2019].

Un des éléments les plus intéressants de ce mémoire est que l'estimation des apports calculés par les images SWOT synthétiques est peu bruitée. Le réservoir Eastmain-1 avait été choisi, en partie, en raison de la qualité de l'estimation de ses apports. En effet, c'est ce qui a pu permettre de confirmer que l'estimation des apports calculés avec SWOT était également de bonne qualité. Cependant, en règle générale, la plupart des apports calculés par Hydro-Québec contiennent beaucoup plus de bruit que pour le cas d'Eastmain-1, en raison notamment de la sensibilité des limnimètres au vent et aux opérations de gestion ou des plans d'eau dont la pente est plus importante. Ainsi, pour d'autres réservoirs similaires à Eastmain-1, il est fort possible que la qualité des résultats d'apports obtenus dans le cadre de ce mémoire soit également maintenue. Dans ces circonstances, il y aurait probablement un nombre considérable de réservoirs pour lesquels l'estimation des apports à partir de SWOT serait moins bruitée que lorsque seul un limnimètre est utilisé. Ainsi, l'application de cette méthodologie mériterait d'être évaluée sur d'autres grands réservoirs.

Également, plusieurs ouvrages appartenant à Hydro-Québec sont constitués de petits réservoirs. Par rapport à la méthodologie présentée dans le cadre de ce mémoire, les petits réservoirs auraient comme avantage d'avoir une couverture complète des images SWOT. Toutefois, ceux-ci comporteraient le risque d'être davantage contaminé par le signal des berges (sol) en plus de ne pas bénéficier autant des opérations de multivisée dans le traitement de l'image. Également, le temps de réponse de ces réservoirs étant plus faible que pour de grands réservoirs, l'interpolation des volumes d'eau entre deux passages successifs de SWOT pourrait manquer des variations de niveau, donc de volume, causées par un événement hydrologique ou une manœuvre au barrage. Dans ce contexte, il serait également intéressant d'évaluer dans quelle mesure SWOT peut estimer les apports calculés par bilan hydrique pour de petits réservoirs.

# ANNEXE A EXPÉRIMENTATIONS DE L'ASSIMILATION DE DONNÉES DANS UN MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

L'objet de cette annexe est de décrire succinctement la théorie de l'assimilation de données et de réaliser plusieurs expériences utilisant le filtre de Kalman d'ensemble dans un contexte d'assimilation des niveaux d'eau à partir de sources externes. Un domaine simple de rivière est utilisé et permet d'expérimenter un ensemble de possibilités qu'offre l'assimilation de données dans un délai de calculs raisonnables. Cette annexe se fractionne du reste du mémoire, car il n'est ici plus question d'analyser le satellite SWOT ou des applications en réservoir. En effet, l'objectif de cette annexe se limite à évaluer le comportement de la modélisation hydrodynamique soumise à diverses expérimentations d'assimilation de données.

Le présent annexe aborde tout d'abord la théorie de l'assimilation de données et se concentre spécifiquement sur le meilleur estimateur linéaire sans biais (MELSB), de même que le filtre de Kalman traditionnel et filtre de Kalman d'ensemble. Par la suite, les domaines d'étude théorique sur lesquels la méthodologie sera expérimentée sont présentés. Une première application du filtre de Kalman d'ensemble est réalisée sur un domaine en supposant une faible hauteur d'eau (cas d'écoulement 1). Le filtre de Kalman d'ensemble sera ici utilisé dans le but d'assimiler le paramètre de frottement du modèle TELEMAC-2D (coefficient de Manning) de manière dynamique. La même approche est ensuite appliquée sur le même domaine avec une hauteur d'eau beaucoup plus importante (cas d'écoulement 2).

Par la suite, différentes expérimentations du filtre de Kalman d'ensemble sur les niveaux d'eau sont appliquées. En particulier, il sera ici question d'évaluer le gain que l'assimilation de données permet de réaliser pour améliorer l'estimation des niveaux d'eau. Une application particulière sera analysée, à savoir le cas où le vecteur des observations ne couvre pas l'entièreté du domaine. En effet, il est pertinent de déterminer l'impact de l'assimilation partielle des niveaux sur la stabilité d'un modèle hydrodynamique.

## A.1 Principe de l'assimilation de données

L'assimilation de données consiste à utiliser conjointement la connaissance apportée par un modèle et des observations afin de déduire une estimation probable de l'état présent ou futur d'un système. Le besoin de l'assimilation de données émane du fait que les modèles ne sont pas parfaits et que ceux-ci sont très dépendants des conditions initiales. Ainsi, une correction de l'état initial d'un modèle est souvent nécessaire lorsqu'il est question de faire des prévisions. Cependant, il n'est pas optimal d'insérer directement une donnée d'observation pour mettre à jour l'état d'un système puisque la mesure comporte elle-même des incertitudes. Ce faisant, un jugement est nécessaire afin d'accorder un degré d'importance plus ou moins grand au modèle ou aux observations.

Traditionnellement, les météorologues et les hydrologues ont utilisé cette approche de manière subjective [Liu et al., 2012]. Ainsi, ceux-ci choisissaient d'accorder plus d'importance au modèle ou aux observations en fonction de leur connaissance personnelle du domaine d'étude. Des méthodes dites objectives relativement simples ont par la suite été développées, notamment la méthode de Cressman [1959]. Peu après, des méthodes plus robustes telles que les filtres de Kalman ou les méthodes variationnelles ont fait leur apparition. Ces méthodes permettent de pondérer objectivement les sorties du modèle et les observations en vue d'obtenir un état corrigé optimal (du point de vue statistique) d'un système. Les sections qui suivent se limiteront aux filtres de Kalman. Les explications qui suivent sont inspirées de Lahoz et al. [2010], Delignon [2009], Bouttier et Courtier [2002] et Babb [2015]. La nomenclature est adaptée de Crassidis et Junkins [2011].

### A.1.1 Meilleur estimateur linéaire sans biais (MELSB)

Supposons le modèle décrit par l'équation A-1 dont  $\mathbf{x}_t^+$  est une approximation d'un vecteur d'état réel  $\mathbf{x}_t$ . Il est question de déterminer la meilleure approximation de l'état d'un système  $\mathbf{x}_t^+$  à partir d'une estimation provenant d'un modèle  $\mathbf{x}_t^-$  et d'observations  $\tilde{\mathbf{y}}_t$ . Le tableau A-1 définit l'ensemble des variables pertinentes pour le MELSB et les filtres de Kalman. Le nombre d'éléments contenus dans le vecteur d'état est défini par  $n$  et le nombre d'observations par  $m$  au pas de temps  $t$ .

Tableau A-1 Définition des paramètres du MELSB

Variable	Description	Dimension
$\mathbf{x}_t$	Vecteur d'état réel (théorique)	(n x 1)
$\mathbf{x}_t^-$	Vecteur de l'estimation préliminaire de l'état réel au temps $t$	(n x 1)
$\mathbf{x}_t^+$	Vecteur de l'estimation pondérée de l'état réel au temps $t$	(n x 1)
$\tilde{\mathbf{y}}_t$	Vecteur des observations de l'état	(m x 1)
$\mathbf{H}$	Opérateur d'observation : convertit le vecteur d'état vers le vecteur d'observations tel que $\tilde{\mathbf{y}}_t = \mathbf{H}(\mathbf{x}_t)$	(m x n)
$\mathbf{R}_t$	Matrice des covariances des erreurs de l'observation	(m x m)
$\mathbf{Q}_t$	Matrice des covariances des erreurs du modèle	(n x n)
$\mathbf{P}_t^-$	Matrice des covariances de l'estimation préliminaire	(n x n)
$\mathbf{P}_t^+$	Matrice des covariances de l'analyse	(n x n)

À l'équation A-1, l'estimation de du vecteur d'état, également nommé « analyse », est calculée suivant une pondération linéaire entre l'estimation de l'état préliminaire fournie par le modèle, aussi appelée « ébauche » et l'observation de l'état.

$$\mathbf{x}_t \approx \mathbf{x}_t^+ = (1 - k)\mathbf{x}_t^- + k(\tilde{\mathbf{y}}_t) \quad (\text{A-1})$$

Le paramètre  $k$  agit comme facteur de pondération de la combinaison linéaire. Celui-ci dépend de la confiance accordée aux variables du problème. Par exemple, pour l'équation A-1, si la confiance envers les observations  $\tilde{\mathbf{y}}_t$  est beaucoup plus grande que celle accordée envers l'estimation d'un modèle  $\mathbf{x}_t^-$ , le paramètre  $k$  tendra vers 1. À l'inverse, si la confiance de  $\mathbf{x}_t^- \gg \tilde{\mathbf{y}}_t$ , le coefficient  $k$  tendra vers 0. Notons que  $\tilde{\mathbf{y}}_t$  est assumé de même taille que  $\mathbf{x}_t^-$  pour simplifier l'explication à l'équation A-1. Toutefois, les sections suivantes vont introduire un opérateur  $\mathbf{H}$  qui permet de transformer l'espace du modèle vers l'espace des observations.

La méthode du MELSB consiste à déterminer de manière objective le paramètre  $k$ , en prenant en compte l'incertitude respective de l'estimation d'un modèle  $\mathbf{x}_t^-$  et des observations  $\tilde{\mathbf{y}}_t$ . Les incertitudes sont caractérisées par les matrices de covariances  $\mathbf{Q}_t$  et  $\mathbf{R}_t$ , lesquelles représentent respectivement les

erreurs d'estimation du modèle  $\mathbf{x}_t^-$  et des observations  $\mathbf{y}_t$  par rapport à l'état réel  $\mathbf{x}_t$ . Le MELSB est déterminé objectivement en minimisant conjointement l'erreur quadratique moyenne des estimateurs  $\mathbf{x}_t^-$  et  $\mathbf{y}_t$  par rapport à  $\mathbf{x}_t$ . Une démonstration mathématique simplifiée est présentée ci-dessous afin de déterminer la valeur du paramètre  $k$ . Pour une application générale, les variables sont sous forme matricielle (se référer au tableau 5-1 pour les dimensions des variables). De plus, il est considéré que les observations  $\mathbf{y}_t$  n'appartiennent pas au même espace vectoriel que  $\mathbf{x}_t^-$ , ce qui nécessite une transformation à l'aide de l'opérateur  $H$ .

#### A.1.1.1 Hypothèses:

- L'espérance  $\mathbf{E}$  des erreurs du modèle et celle des observations sont non biaisées, tel que :
  - $\mathbf{E}(\mathbf{x}_t^- - \mathbf{x}_t) = \mathbf{E}(\mathbf{y}_t - \mathbf{x}_t) = 0$  ;
- L'espérance des erreurs du modèle et celle des observations sont non corrélées, tel que :
  - $(\mathbf{x}_t^- - \mathbf{x}_t)(\mathbf{y}_t - H(\mathbf{x}_t))^\top = 0$  ;
- Les matrices  $\mathbf{Q}_t$  et  $\mathbf{R}_t$ , sont définies et positives ;
- Pour tout point  $\mathbf{x}$  près de  $\mathbf{x}_t^-$ ,  $H(\mathbf{x}) - H(\mathbf{x}_t^-) \approx H(\mathbf{x} - \mathbf{x}_t^-)$ , où l'opérateur  $H$  est considéré comme linéaire ( $H = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}$ ).

#### A.1.1.2 Démonstration simple

Supposons deux lois multinormales telles que la première représente la distribution du vecteur d'état  $\mathbf{x}_t^-$  et la seconde le vecteur des observations  $\mathbf{y}_t$ , dont les paramètres de moyenne et d'écart-type peuvent être calculés tels que présentés au tableau A-2.

Tableau A-2 Distribution et paramètres des lois multinormales (modèle et observations)

Type de données	Distribution de probabilité
Vecteur d'état du modèle ( $\mathbf{x}_t^-$ )	$N(H(\mathbf{x}_t^-), H\mathbf{P}_t^-H^\top)$
Vecteur des observations ( $\mathbf{y}_t$ )	$N(\mathbf{y}_t, \mathbf{R}_t)$

D'après le théorème de Bayes, la probabilité de minimiser l'erreur de  $\mathbf{x}_t^-$  et  $\mathbf{y}_t$  par rapport au vecteur  $\mathbf{x}_t$  se calcule par la multiplication bayésienne des deux distributions multinormales ci-dessus. Ce faisant, une troisième distribution multinormale est obtenue, dont les paramètres sont présentés au tableau A-3.

Tableau A-3 Détermination des paramètres du MELSB

Estimateur de la moyenne ( $\mu'$ )	$\mathbf{x}_t^- + \mathbf{K}_t(\tilde{\mathbf{y}}_t - \mathbf{H}(\mathbf{x}_t^-))$
Estimateur de la variance ( $\sigma'^2$ )	$(\mathbf{I} - \mathbf{K}_t\mathbf{H})\mathbf{P}_t^-$
où $\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t)^{-1}$ et $\mathbf{I}$ est la matrice identité	

Finalement, le résultat ci-dessus implique que les approximations optimales  $\mathbf{x}_t^+$  et de  $\mathbf{P}_t^+$  sont définies par :

$$\mathbf{x}_t^+ = \mathbf{x}_t^- + \mathbf{K}_t(\tilde{\mathbf{y}}_t - \mathbf{H}(\mathbf{x}_t^-)) \quad (\text{A-2})$$

$$\mathbf{P}_t^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t\mathbf{H})\mathbf{P}_t^- \quad (\text{A-3})$$

### A.1.2 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est une séquence permettant l'estimation optimale de l'état réel d'un système. Sous les mêmes hypothèses que celles définies à la section A.1.1.1, le filtre de Kalman est le meilleur estimateur linéaire sans biais (MELSB). La séquence se divise en deux étapes : 1) La prédiction d'un état futur à partir d'un état présent; 2) La correction de l'état et de la matrice de covariance de l'erreur. Le filtre de Kalman est surtout utilisé pour les problèmes variant dans la dimension du temps  $t$ . La séquence complète du filtre de Kalman est présentée ci-dessous. Pour des considérations pratiques, la nomenclature du tableau 5-1 est conservée.

#### Algorithme de Kalman

- 1) Séquence de prédiction d'un état futur
  - a. Prédiction d'une première estimation de l'état futur à partir d'un modèle où  $\mathbf{M}$  est une matrice de prédiction liant l'état présent de l'état futur et  $\mathbf{w}_t$  est la matrice d'erreur associée à la mise à jour de l'état avec le modèle.  $\mathbf{H}$  est l'opérateur permettant de définir le vecteur d'état dans l'espace des observations et  $\mathbf{v}_t$  est la matrice d'erreur associée aux observations :

$$\mathbf{x}_t^- = \mathbf{M}(\mathbf{x}_{t-1}^+) + \mathbf{w}_t, \mathbf{w}_t \sim N(0, \mathbf{Q}_t) \quad (\text{A-4})$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_t = \mathbf{H}(\mathbf{x}_t^-) + \mathbf{v}_t, \mathbf{v}_t \sim N(0, \mathbf{R}_t) \quad (\text{A-5})$$

- b. Mise à jour de la matrice de covariance de l'erreur de l'estimation du modèle  $P_t^-$ :

$$P_t^- = MP_{t-1}^-M^T + Q_{t-1} \quad (\text{A-6})$$

- 2) Correction de l'état et de la matrice  $P_t^-$

- a. Calcul de la matrice de gain  $K_t$ :

$$K_t = P_t^-H^T(HP_t^-H^T + R_t)^{-1} \quad (\text{A-7})$$

- b. Mise à jour pondérée de l'état du système en tenant compte des observations :

$$x_t^+ = x_t^- + K_t(\tilde{y}_t - H[x_t^-]) \quad (\text{A-8})$$

- c. Mise à jour de la matrice de covariance de l'analyse  $P_t^+$ :

$$P_t^+ = (I - K_tH)P_t^- \quad (\text{A-9})$$

### A.1.3 Filtre de Kalman d'ensemble

Le filtre de Kalman présenté à la section A.1.2 est difficile à implémenter pour les systèmes ayant un nombre très élevé de dimensions étant donné la taille de la matrice  $P_t$ . Le filtre de Kalman d'ensemble repose sur la méthode de Monte Carlo. Celui-ci reprend la même séquence que le filtre de Kalman, à la différence qu'une multitude de prédictions de l'état est générée par un processus stochastique. Ainsi, tel que montré à la figure A-1, des états futurs constituant un ensemble sont considérés équiprobables et sont représentés par plusieurs membres du vecteur d'état  $x_t^{-(j)}$  dont  $j$  varie entre 1 et le nombre de membres  $N$  de l'ensemble.



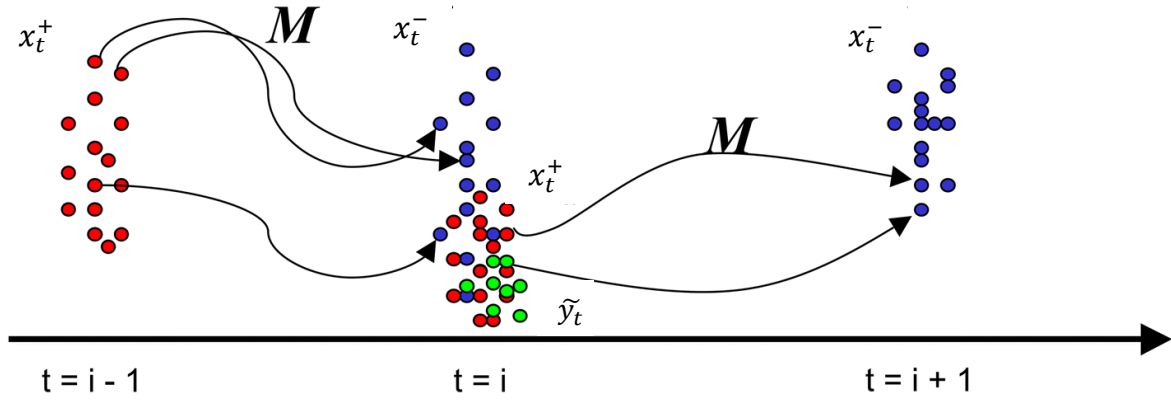


Figure A-1 Processus d'assimilation du filtre de Kalman d'ensemble. Modifié de Abbasi et al. [2019]

La matrice de covariance  $P_t$  est alors tout simplement estimée à partir de la distribution de l'ensemble des états. L'équation A-4 est ainsi remplacée par l'équation A-10. L'équation A-9 de la matrice de covariance  $P_t$  est remplacée par les équations A-11 et A-12 :

$$x_t^{-(j)} = M(x_{t-1}^{+(j)}) + w_t, w_t \sim N(0, Q_t) \quad (\text{A-20})$$

$$P_t^{exey} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [x_t^{-(j)} - x_t^-] [y_t^{-(j)} - y_t^-]^T \quad (\text{A-11})$$

$$P_t^{eyey} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [y_t^{-(j)} - y_t^-] [y_t^{-(j)} - y_t^-]^T \quad (\text{A-12})$$

L'opérateur  $H$  permet toujours de convertir l'état d'un membre du vecteur d'état  $x_t^{-(j)}$  dans l'espace des observations  $y_t^{-(j)}$  tel que montré à l'équation A-13 et les vecteurs moyens des ensembles  $x_t^{-(j)}$  et  $y_t^{-(j)}$  sont définies par A-14 et A-15 :

$$y_t^{-(j)} = H(x_t^{-(j)}) \quad (\text{A-33})$$

$$x_t^- = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [x_t^{-(j)}] \quad (\text{A-44})$$

$$y_t^- = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [y_t^{-(j)}] \quad (\text{A-55})$$

Enfin, pour la séquence de correction des vecteurs d'états, le gain de Kalman introduit à l'équation A-7 est redéfini par A-16 :

$$\mathbf{K}_t = P_t^{e_x e_y} (P_t^{e_y e_y})^{-1} \quad (\text{A-6})$$

et la mise à jour des vecteurs d'état de l'équation A-8 est adaptée au cas d'ensemble à l'équation A-17 :

$$x_t^{+(j)} = x_t^{-{(j)}} + \mathbf{K}_t (\tilde{y}_t - y_t^{-{(j)}}) \quad (\text{A-17})$$

ce qui est équivalent à l'équation A-18 si  $y_t^{-{(j)}}$  est substitué par l'équation A-13 :

$$x_t^{+(j)} = x_t^{-{(j)}} + \mathbf{K}_t (\tilde{y}_t - H(x_t^{-{(j)}})) \quad (\text{A-7})$$

## A.2 Conditions des cas d'écoulement

Pour réaliser les objectifs de ce chapitre, deux cas d'écoulement seront étudiés.

### A.2.1 Cas d'écoulement

#### A.2.1.1 Premier cas d'écoulement : rivière de 100 mètres de largeur

Dans le premier cas, un domaine de petite taille dont la distance longitudinale est de 500 mètres et la largeur est de 100 mètres sera mis en œuvre. Une représentation de ce domaine comportant 319 nœuds et 551 éléments finis triangulaires est présentée à la figure A-1. La bathymétrie est constante et fixée à zéro mètre dans un référentiel relatif, ce qui implique que le fond de la rivière est plat. De plus, les parois sont verticales sur l'ensemble du domaine. La condition frontière entrante du modèle est un débit alors que la condition sortante est un niveau fixe. Le maillage a été emprunté des tutoriels qui accompagnent le programme TELEMAC et a été choisi puisqu'il est simple et rapide à exécuter [Ata et al., 2014].

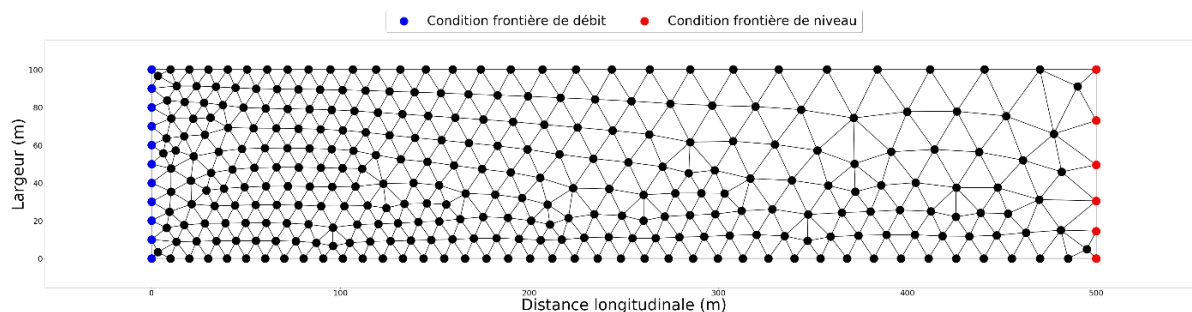


Figure A-2 Domaine d'étude pour l'assimilation de données dans le modèle TELEMAC-2D

La simulation débute à un niveau de départ nul sur l'ensemble du domaine avec un débit entrant également nul. La simulation, qui progresse à un pas de temps de 1 seconde, est exécutée sur une durée totale de 3000 secondes. Pendant la durée de la simulation, le débit est constant à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  et le niveau aval est fixé à 0,5 mètre, ce qui implique une vitesse moyenne de 1,0 m/s à la sortie. Le coefficient de Manning est fixé à 0,029 sur l'ensemble du domaine.

#### A.2.1.2 Second cas d'écoulement : rivière de 100 mètres de largeur avec une profondeur importante de 30 mètres

Le modèle reprend les mêmes conditions que celles énoncées à la section A.1.1. Toutefois, le débit est constant à  $5000 \text{ m}^3/\text{s}$  et le niveau d'eau aval est fixé à 30 mètres, ce qui implique une vitesse moyenne d'environ 1,6 m/s à la sortie.

### A.2.2 Calage dynamique du modèle

Bien qu'il existe plusieurs approches robustes pour effectuer le calage d'un modèle, par exemple à l'aide d'une fonction objective minimisant l'écart avec des niveaux observés, il est plutôt rare pour un modèle opérationnel de réviser périodiquement ses paramètres. Or, le coefficient de Manning peut varier dans le temps en fonction de la modification de la bathymétrie ou de la hauteur d'eau. Un calage dynamique permettrait d'ajuster de manière quasi automatique le coefficient de Manning, ce qui pourrait procurer de meilleure performance de la part du modèle à travers le temps.

#### A.2.2.1 Méthodologie

Pour chacune des conditions d'écoulement définies au chapitre A.1, il sera ici tenté de caler dynamiquement chaque modèle hydrodynamique 2D à l'aide de 10 simulations dont le coefficient de Manning, le vecteur d'état, est intentionnellement erroné au premier pas de temps entre la plage 0,018

à 0,10. Cette plage est très large, mais elle permet d'évaluer si le modèle hydrodynamique peut converger vers le bon état malgré une condition de départ très éloignée de la solution. Cette section est inspirée des travaux de Zaoui et al. [2018] qui ont étudié l'assimilation de données pour le calage dynamique en 1D et 2D. Pour chacune des 10 simulations, des cas avec 5, 10 et 20 membres seront utilisés pour le filtre de Kalman d'ensemble.

En reprenant les conventions décrites à la section 5.1, le vecteur d'état  $\mathbf{x}_t^{-(j)}$  de dimension  $(n \times 1)$ , où  $j$  est un membre de l'ensemble de taille  $N$ , est initialisé comme suit :

$$\mathbf{x}_{t=0}^{-(j)} \sim N(\mathbf{x}_0 = n_{ini}, P_0 = 0.01) \quad (\text{A-19})$$

Avec  $n_{ini}$  est le coefficient de Manning de départ du modèle hydrodynamique variant entre 0,018 à 0,10 et  $P_0$  est l'écart-type utilisé pour définir  $\mathbf{x}_t^{-(j)}$  au pas de temps  $t=0$ . Puisque le coefficient de Manning est uniforme sur l'ensemble du domaine, le vecteur d'état est de dimension  $n = 1$  pour chaque membre.

Le modèle est mis à jour à l'aide d'observations  $\tilde{\mathbf{y}}_t$ . Cette variable peut être un scalaire si seulement une valeur d'observation est disponible (limnimètre) ou un vecteur de taille  $m$ , par exemple dans le cas d'une image SWOT couvrant un domaine contenant plusieurs nœuds du modèle hydrodynamique ou lorsque plusieurs variables sont disponibles à un seul nœud. L'état actuel du modèle  $\mathbf{x}_t^{(j)}$  est transposé dans l'espace des observations à l'aide de  $\mathbf{y}_t^{(j)} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_t^{-(j)})$  pour chaque membre  $j$  de l'ensemble de vecteurs d'état du paramètre de frottement. L'erreur sur les observations  $\mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_t)$  est un vecteur de dimensions  $m$  pour chaque membre de l'ensemble.

Supposons le cas où un seul point d'observation  $\tilde{\mathbf{y}}_t$  soit disponible, au centre du domaine, et que la hauteur d'eau, la vitesse longitudinale et transversale du courant soient mesurées, alors la matrice de covariance des erreurs liées aux observations  $\mathbf{R}_t$  ( $m \times m$ ) prendrait la forme suivante :

$$\mathbf{R}_t = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \varepsilon_2 & \varepsilon_3 \varepsilon_2 \\ 0 & \varepsilon_2 \varepsilon_3 & \varepsilon_3 \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A-20})$$

Où  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  et  $\varepsilon_3$  sont respectivement les erreurs sur l'observation de la hauteur d'eau, de la vitesse longitudinale et transversale avec  $m = 3$ . Pour les fins de simulations, ces erreurs sont estimées à  $\varepsilon_1 = 10^{-2} m$ ,  $\varepsilon_2 = 10^{-4} m/s$  et  $\varepsilon_3 = 10^{-4} m/s$ . L'erreur de niveau  $\varepsilon_1$  a été définie à partir des conclusions du chapitre 4 pour l'application sur Eastmain-1, où il a été défini que l'erreur des images SWOT sur l'ensemble du réservoir était de l'ordre du centimètre. Les vitesses sont considérées indépendantes de la hauteur d'eau, ce qui implique certains termes nuls dans la matrice  $R_t$  et sont considérées plus précises que la hauteur d'eau. Les vitesses d'écoulement sont utilisées pour cette démonstration de calage dynamique afin de démontrer qu'il est possible d'utiliser plusieurs sources d'observations différentes dans un processus d'assimilation de données. Toutefois, étant donné l'objectif de ce chapitre, seuls les niveaux d'eau seront inclus pour l'assimilation de données aux prochaines sections. La mise à jour du modèle s'effectue par l'équation A-18 et la prédiction de l'état du modèle au prochain pas de temps est réalisée à l'aide de l'équation A-10.

L'erreur causée par le modèle  $w_k \sim N(0, Q_t)$  est un vecteur de dimensions  $n$  pour chaque membre de l'ensemble avec la matrice de covariance de l'erreur du modèle de dimension  $(n \times n)$ . Dans le cas de figure où la variable d'état  $x_t^{-(j)}$  est un scalaire (coefficient de Manning uniforme) de dimension  $n=1$ , la matrice de covariance  $Q_t$  devient tout simplement un scalaire. Pour le modèle hydrodynamique TELEMAC-2D,  $Q_t$  est estimé à  $10^{-6}$  basé sur l'estimation de Zaoui [2018].

La fonction  $M$  de l'équation A-10 consiste en une simulation du modèle hydrodynamique. Cette équation est utilisée à chaque pas de temps, même si aucune observation  $\tilde{y}_t$  est disponible. Dans ce cas de figure où il y a absence d'observations, le modèle hydrodynamique devient la seule fonction qui permet d'estimer l'état du système. Pour les fins de ces simulations, l'état du paramètre de frottement (coefficient de Manning) est mis à jour que lorsque des observations sont disponibles.

## A.2.3 Résultats

### A.2.3.1 Condition première : rivière de 100 mètres de largeur avec faible hauteur d'eau

Les conditions d'écoulement décrites à la section A.2.1.1 sont appliquées avec la méthodologie de calage du paramètre de frottement étayé à la section A.2.2. Le niveau initial sur l'ensemble du domaine est estimé à 0,5 mètre. La solution convergée avec le bon coefficient de Manning de 0,029 est présentée à la figure A-3 et la hauteur d'eau moyenne est évaluée à 0,768 mètre.

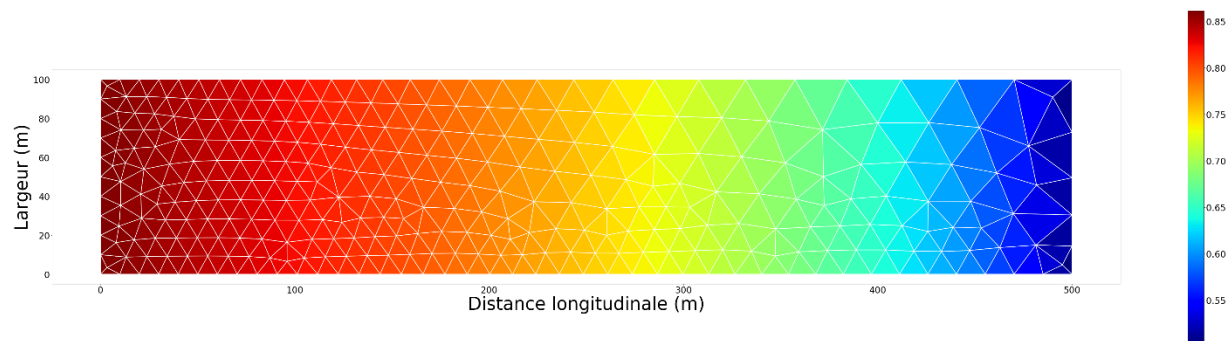


Figure A-3 Distribution de la hauteur d'eau atteinte pour un débit constant de 50 m<sup>3</sup>/s

Pour ce domaine, l'impact du coefficient de Manning est important. En effet, tel que présenté à la figure A-4, le niveau d'eau moyen varie de 0,661 à 1,28 mètre respectivement pour les coefficients de Manning 0,018 et 0,100, soit une différence de 94%. Ainsi, la différence de hauteur étant si importante, il est attendu que l'assimilation de données pour le calage du paramètre de frottement amène des gains sur la performance du modèle hydrodynamique.

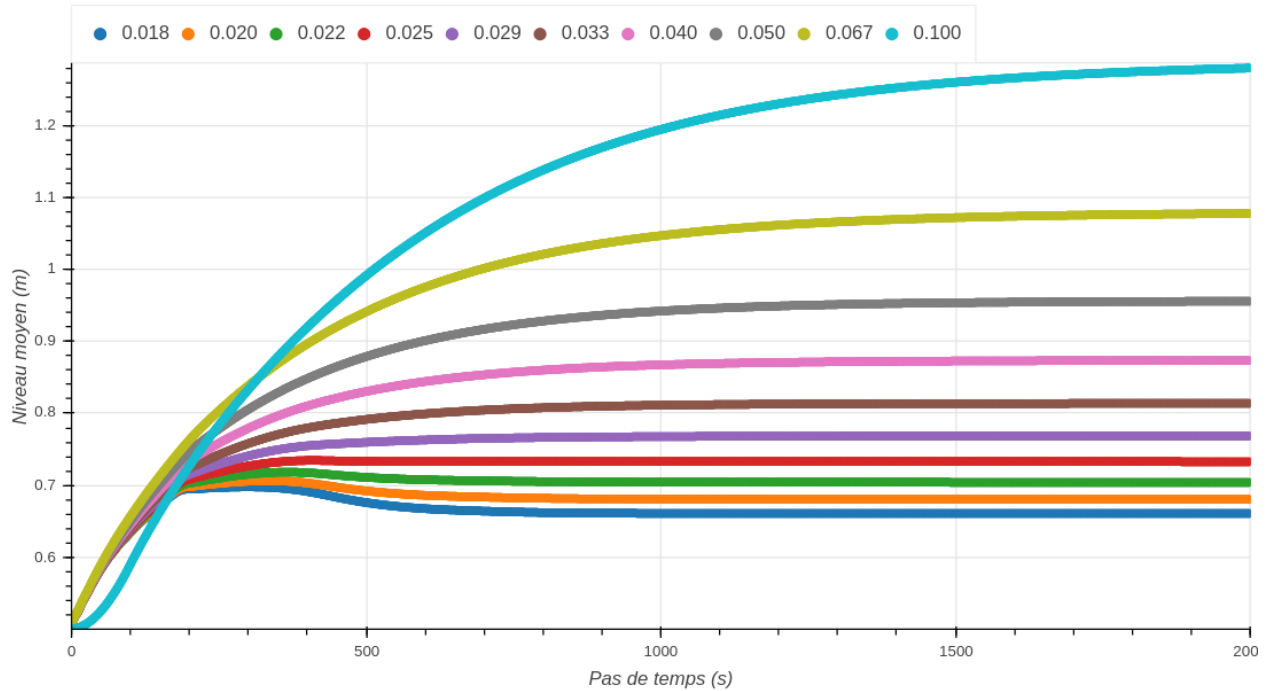


Figure A-4 Évolution du niveau moyen de l'eau en fonction du coefficient de Manning (domaine A.2.1.1)

Pour les applications pratiques, le coefficient de Manning n'est pas connu d'avance et celui-ci doit être évalué, généralement par un processus de calage à l'aide d'observations. Ainsi, pour estimer cette incertitude, 10 simulations débutant avec un coefficient de Manning intentionnellement différent sont calculées avec respectivement 5, 10 et 20 membres en perturbant le coefficient de Manning au moyen de l'équation A-1.

Il est à noter ici qu'un seul point d'observation comprenant la hauteur et la vitesse d'écoulement longitudinale et latérale est disponible au centre du domaine. Cette observation est considérée parfaite, c'est-à-dire que celle-ci ne comporte pas d'erreurs. Ainsi, l'intérêt de cette simulation est d'évaluer si l'algorithme de Kalman d'ensemble est suffisamment puissant pour être influencé par un seul point (nœud). Est-ce que celui-ci peut être utilisé pour effectuer un calage dynamique du paramètre de Manning ?

Les figures A-5, A-6, et A-7 présentent l'évolution de l'état du coefficient de Manning pour chaque cycle d'assimilation. Le nombre de membres de l'ensemble est de 20. Le pas de temps de la simulation

est de 1 seconde et ces cycles d'assimilations sont effectués respectivement à chaque 50, 100 et 250 pas de temps (en secondes). Par exemple, pour le cycle de 250 pas de temps, une seule assimilation est effectuée à chaque 250 pas de temps. Les boîtes à moustaches présentent la distribution de l'état du coefficient de Manning pour chacune des 10 simulations ayant des coefficients de Manning de départ différent.

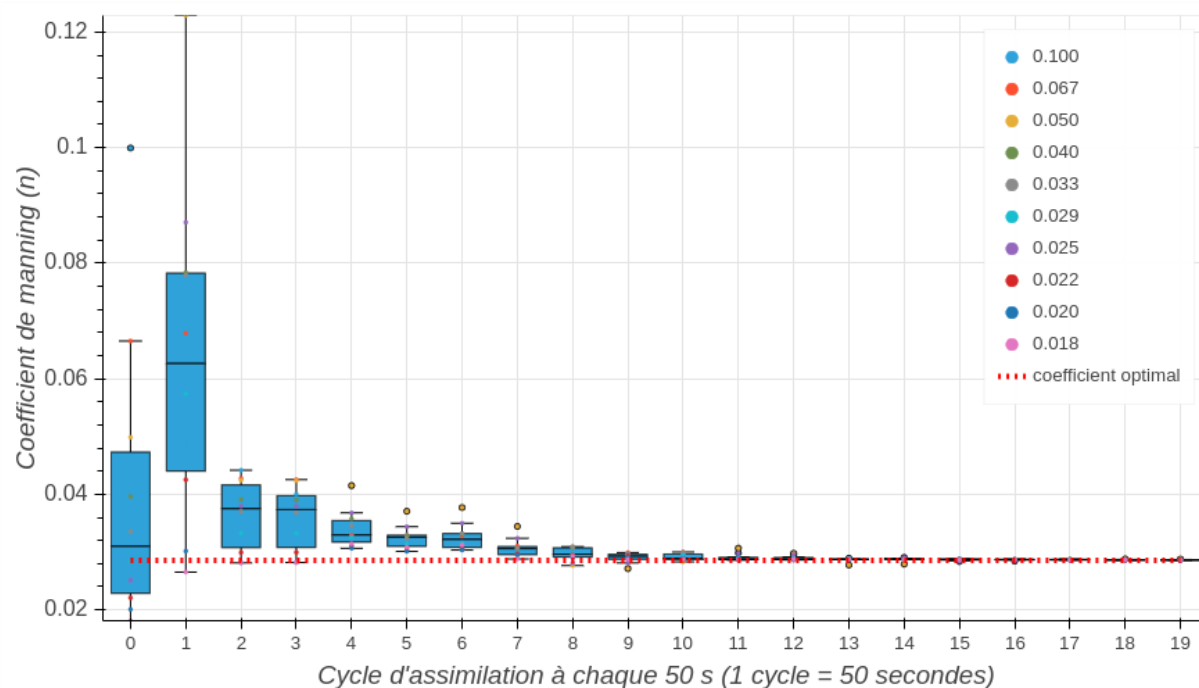


Figure A-5 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 50 secondes selon la valeur de départ (20 membres)



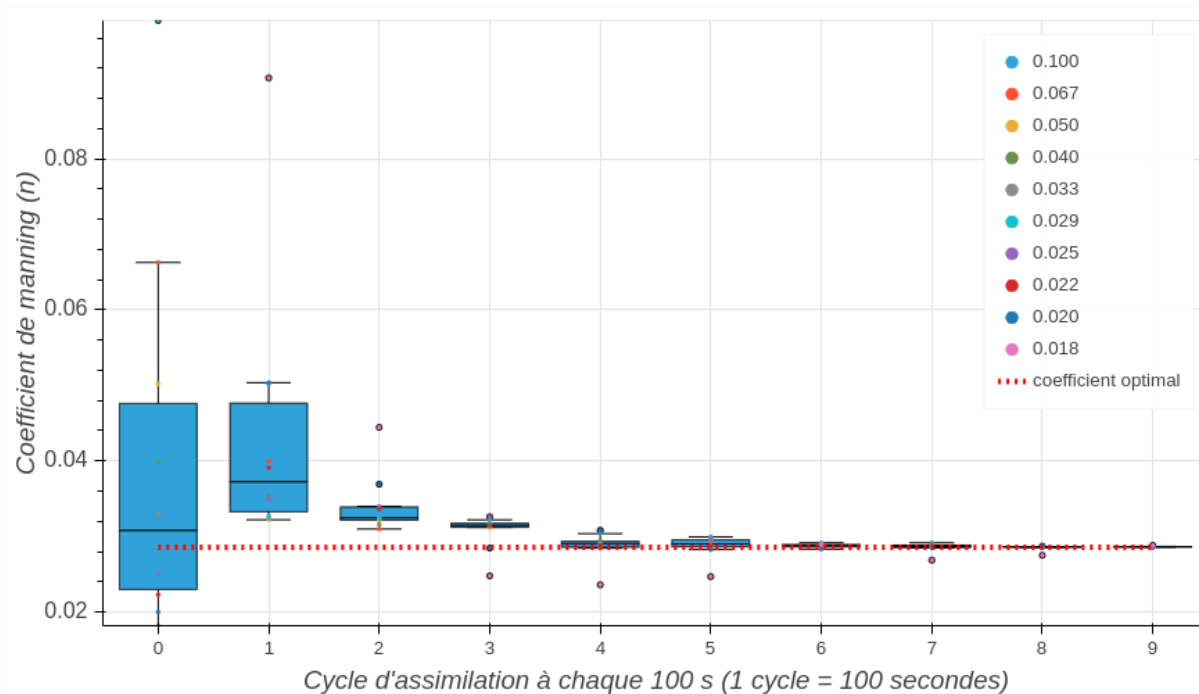


Figure A-6 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 100 secondes selon la valeur de départ (20 membres)

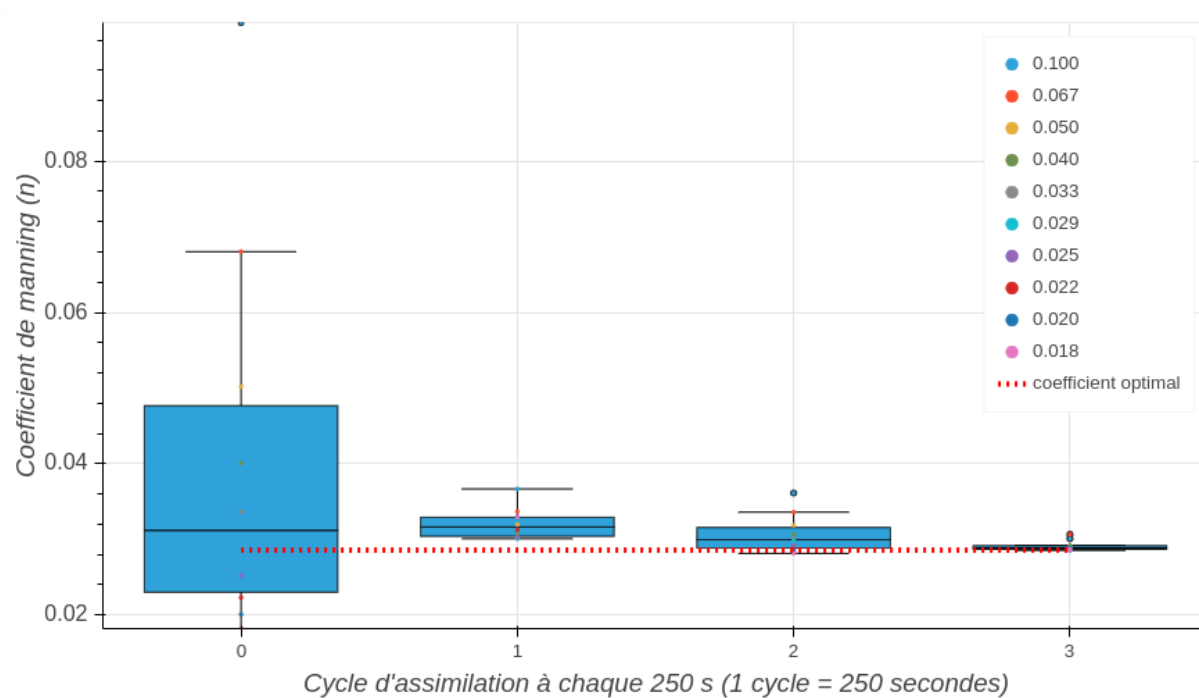


Figure A-7 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 250 secondes selon la valeur de départ (20 membres)

Pour l'ensemble des cas, le coefficient de Manning du modèle hydrodynamique est ajusté automatiquement et converge vers la solution optimale. Pour cette expérimentation, la durée entre chaque cycle d'assimilation ne semble pas impacter fortement la convergence du modèle. En effet, pour toutes les simulations, les premiers cycles d'assimilation résultent en une large dispersion du coefficient de Manning. Toutefois, assez rapidement, après environ 500 secondes de simulation pour les cycles d'assimilation à 50 et à 100 secondes, l'ensemble des coefficients de Manning s'approche très rapidement de la valeur théorique. Le cycle d'assimilation à 250 secondes atteint une convergence satisfaisante après environ 1000 secondes.

### A.2.3.2 Condition seconde : rivière de 100 mètres de largeur avec une hauteur d'eau importante de 30 mètres

Le schéma d'assimilation de données pour caler un modèle hydrodynamique est appliqué au domaine décrit à la section A.2.1.2. Les mêmes conditions que précédemment sont appliquées, mais cette fois, la hauteur d'eau est d'environ 30 mètres. Ce cas de simulation est plus adapté au contexte de réservoir. La figure A-8 présente la solution convergée sur l'ensemble du domaine et la figure A-9 montre l'évolution du niveau moyen de l'eau en fonction du coefficient de Manning. Le niveau minimum et maximal atteint est de 30,00 et 30,09 m pour des coefficients de Manning de respectivement 0,018 et 0,100. De plus, 8 simulations parmi les 10 sont comprises à l'intérieur d'un intervalle de niveau d'eau d'environ 2 cm.

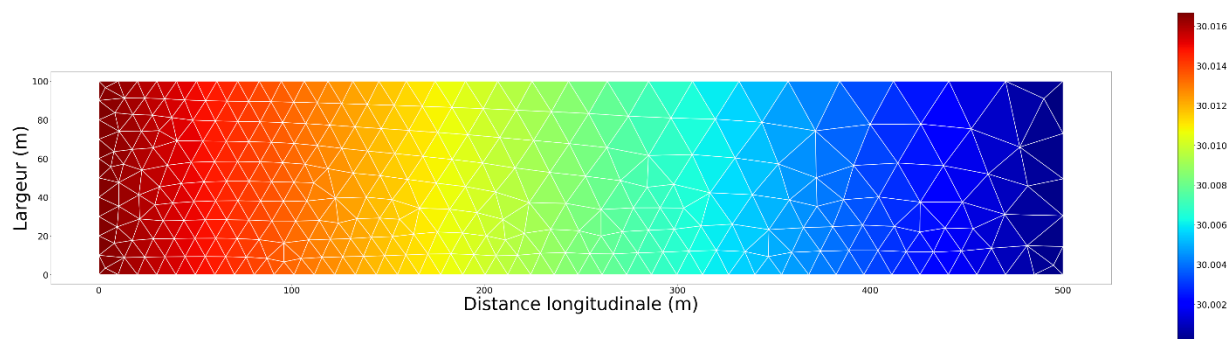


Figure A-8 Distribution de la hauteur d'eau (m) atteinte pour un débit constant de 5000 m<sup>3</sup>/s

Ainsi, étant donné l'impact limité du coefficient de Manning pour ce domaine, il est attendu que l'assimilation de données aura un impact limité sur le calage du paramètre de frottement. Ceci serait conforme aux conclusions du chapitre 3, lequel avait déterminé que le coefficient de Manning était négligeable dans la modélisation du réservoir Eastmain-1.

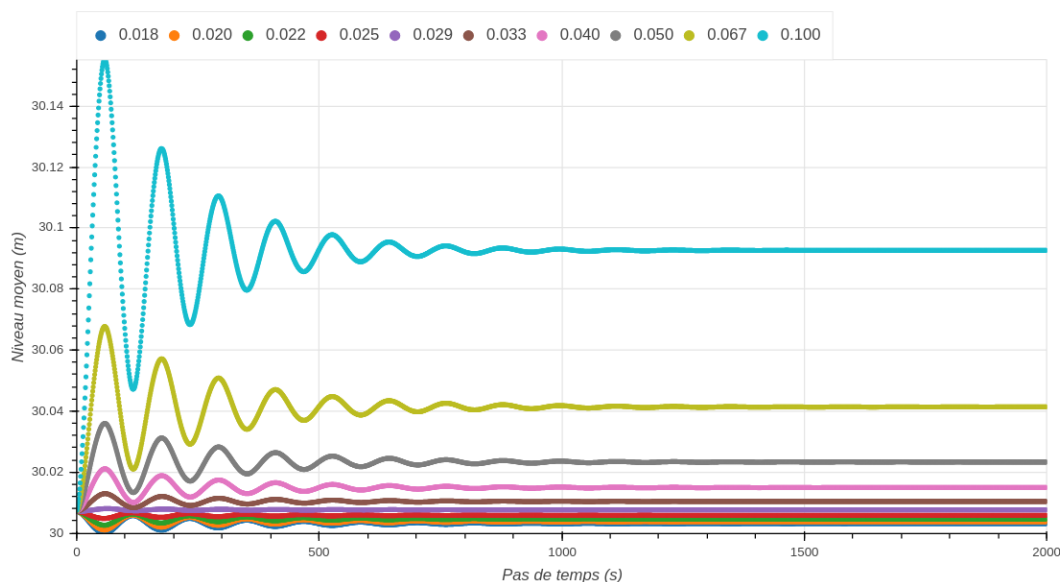


Figure A-9 Évolution du niveau moyen de l'eau en fonction du coefficient de Manning (domaine 5.2.1.2)

Les figures A-10 et A-11 présentent l'évolution du coefficient de Manning pour des cycles d'assimilation de 250 et 50 pas de temps (secondes). La taille de l'ensemble est de 20 membres. La plage des valeurs de Manning diminue avec le temps, mais ne converge pas vers la solution optimale. Toutefois, le niveau moyen est très près de la valeur optimale puisque pour des hauteurs d'eau assez importantes, le coefficient de frottement n'a pas un impact aussi important sur le niveau atteint.

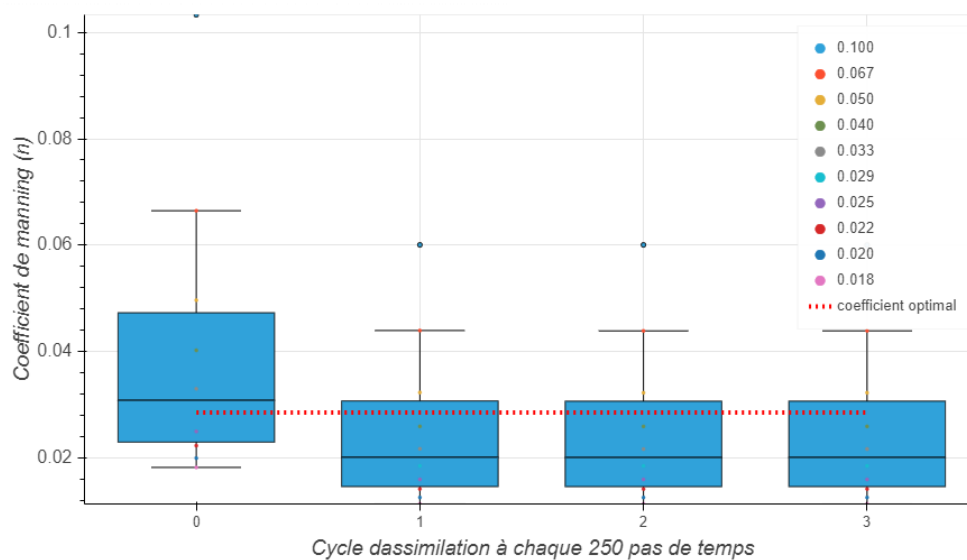


Figure A-10 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 250 secondes selon la valeur de départ (20 membres)

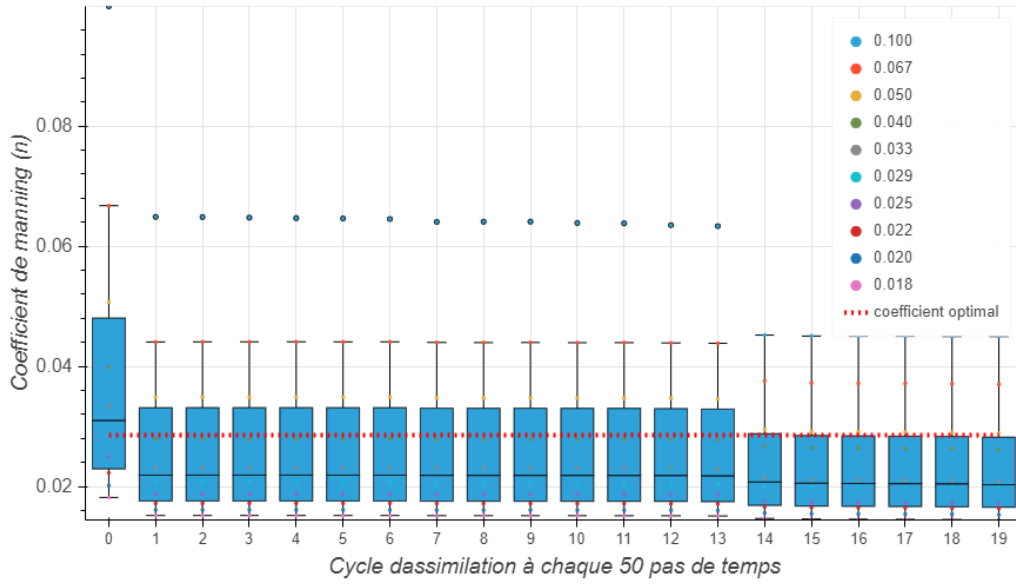


Figure A-11 Coefficient de Manning corrigé à chaque cycle d'assimilation de 50 secondes selon la valeur de départ (20 membres)

## A.3 Correction des niveaux d'eau sur l'ensemble du domaine

### A.3.1 Méthodologie

L'assimilation de données peut être utilisée pour le cas où un modèle hydrodynamique est configuré sur un domaine, mais où l'état du modèle et les observations sont incertains. En effet, dans ces circonstances, une autre source d'information, par exemple la hauteur d'eau, peut être assimilée au modèle dans le but d'améliorer l'estimation de l'état du niveau d'eau. Pour ce faire, le vecteur  $x_t^{-(j)}$  comprend l'ensemble des hauteurs d'eau de tous les nœuds du modèle. Le vecteur des observations  $\tilde{y}_t$  comprend l'ensemble des observations pour chaque nœud du modèle. Pour ce cas, comme les observations sont directement aux nœuds du modèle, cela implique que  $H(x_t^{-(j)}) = y_t^{-(j)}$  est équivalent à  $x_t^{-(j)} = y_t^{-(j)}$  pour chacun des membres dans l'espace. L'estimation des hauteurs d'eau du modèle. L'estimation de la matrice de covariance des erreurs des observations  $R_t$  est une matrice de taille  $m \times m$  dont chaque élément de la diagonale est égal à  $\varepsilon_1 = 10^{-2}$ . Les composantes de  $Q_t$  sont estimés à  $10^{-6}$  basé sur l'estimation de Zaoui [2018] pour TELEMAC

## A.3.2 Résultats

### A.3.2.1 Premier cas d'écoulement : rivière de 100 mètres de largeur avec faible hauteur d'eau

Le domaine A.2.1.1 est considéré sous les conditions d'un débit entrant de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  de débit entrant et d'une profondeur d'eau de  $0,5 \text{ m}$  à la sortie comme l'état « vérité » du domaine.

Pour considérer les erreurs liées au modèle, les données entrant (débit et profondeur à la sortie) ont été bruitées à l'aide d'une loi gaussienne. L'erreur considérée est de  $0,1 \text{ m}$  pour la profondeur d'eau et de  $5\%$  pour le débit. Notons que ces erreurs pourraient varier en fonction de la méthode d'acquisition (qualité du jaugeage, influence du vent et des opérations de gestion hydrique). Ainsi, les séries temporelles bruitées de débits entrants et de niveaux à la sortie sont présentées à la figure A.12. Par ailleurs, ces séries temporelles sont définies à la minute pour une durée totale de simulation de quatre jours, ce qui implique un total de 5760 pas de temps.

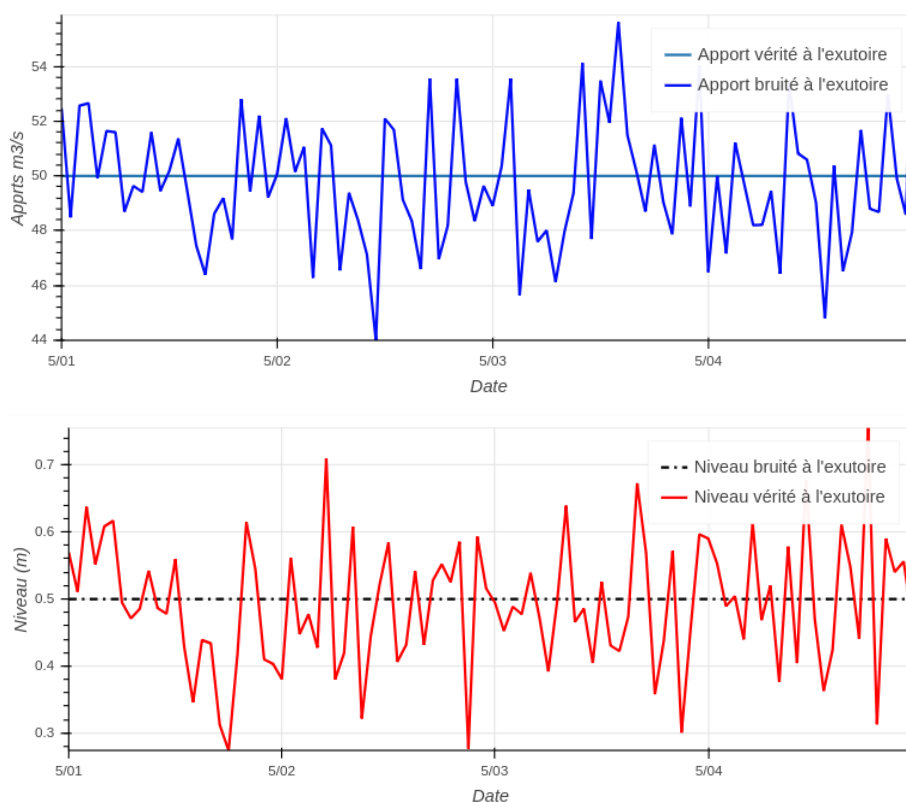


Figure A-12 Comparaison des apports et des niveaux après application de bruit gaussien sur le jeu considéré comme « vérité ».

À partir de la modélisation « vérité », il est également possible de bruitez les élévations de surface d'eau afin de se constituer un échantillon d'observations complémentaire. Un bruit gaussien a également été utilisé pour générer des images synthétiques de niveau d'eau. Une erreur de 15 cm a été considérée, afin de tenir compte de l'incertitude de la donnée (provenant par exemple de la télédétection), mais également des incertitudes liées aux transformations  $H(x_t^{-(j)}) = y_t^{-(j)}$ , par exemple : le traitement géospatial du pixel d'une image radar vers un nœud d'un maillage d'un modèle hydrodynamique. Ainsi, deux sources permettent d'évaluer le niveau des eaux de surfaces : la modélisation hydrodynamique avec les intrants bruités et les observations « externes »  $\tilde{y}_t$ .

Étant donné la taille importante du vecteur d'état de niveaux d'eau de 319 nœuds, le filtre de Kalman d'ensemble est idéal pour obtenir le meilleur estimateur des niveaux d'eau. Pour ce faire, un ensemble de 60 membres a été généré. La solution initiale des niveaux d'eau aux nœuds du réservoir provient du modèle hydrodynamique bruité convergé. L'application du filtre de Kalman d'ensemble est présentée à la figure A-13. Plus spécifiquement, l'aire comprise entre les membres les plus extrêmes est présentée.

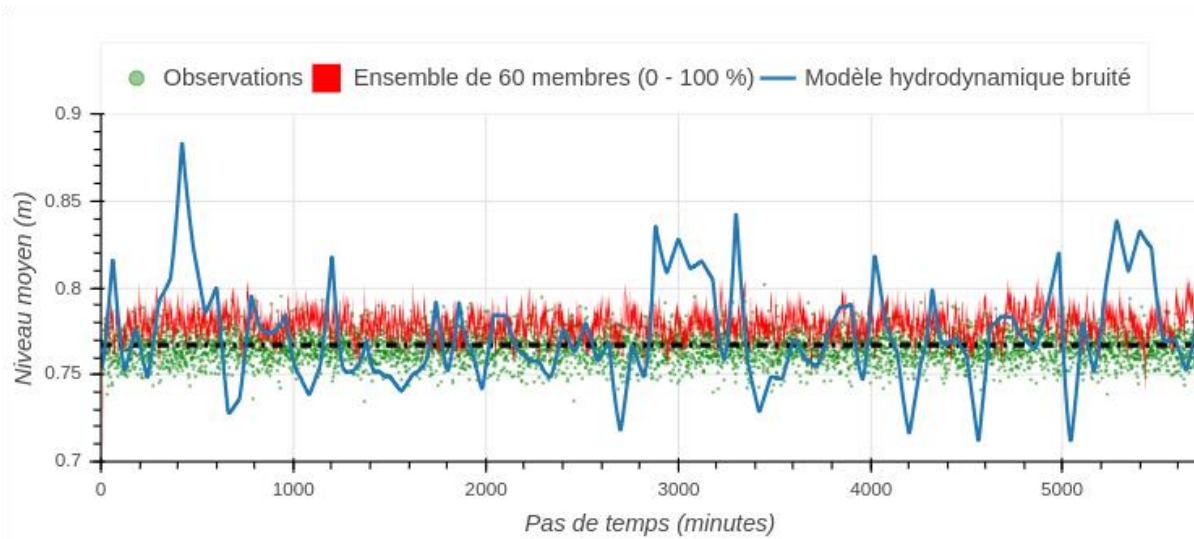


Figure A-13 Comparaison du niveau moyen estimé par le modèle hydrodynamique bruité, les observations et les 60 membres d'ensemble

L'ensemble présenté à la figure A-13 fait l'hypothèse que des données d'observations sont disponibles en tout temps.

### A.3.2.2 Second cas d'écoulement : rivière de 100 mètres de largeur avec une hauteur d'eau élevée

Le domaine A.2.1.2 est considéré sous les conditions d'un débit entrant de  $5000 \text{ m}^3/\text{s}$  de débit entrant et d'une profondeur d'eau de 30 m à la sortie comme l'état « vérité » du domaine, ce qui implique une vitesse moyenne d'environ 1,6 m/s à la sortie. Les mêmes hypothèses d'erreurs relatives et absolues que présentées à la section A.3.2.1 sont considérées pour cette expérimentation. Les conditions initiales aux frontières sont présentées à la figure A-14.

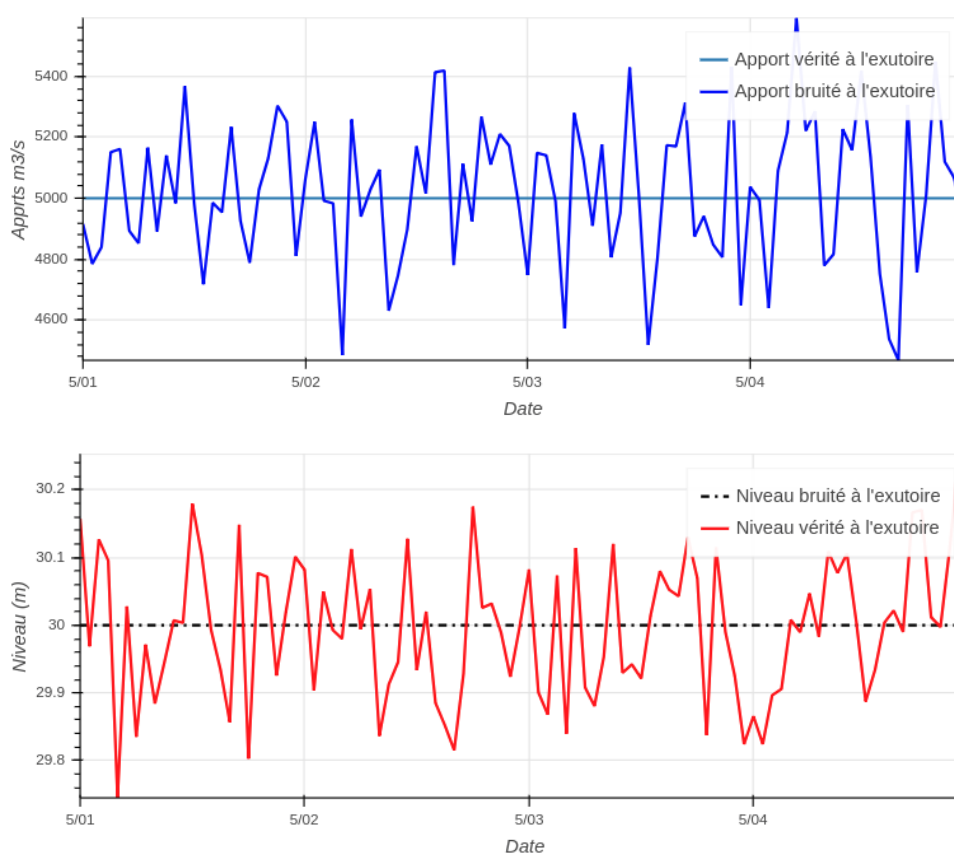


Figure A-14 Comparaison des apports et des niveaux après application de bruit gaussien sur le jeu considéré comme « vérité ».

Comme pour la simulation A.3.2.1, le filtre d'ensemble de Kalman est appliqué et est présenté à la figure A-15.

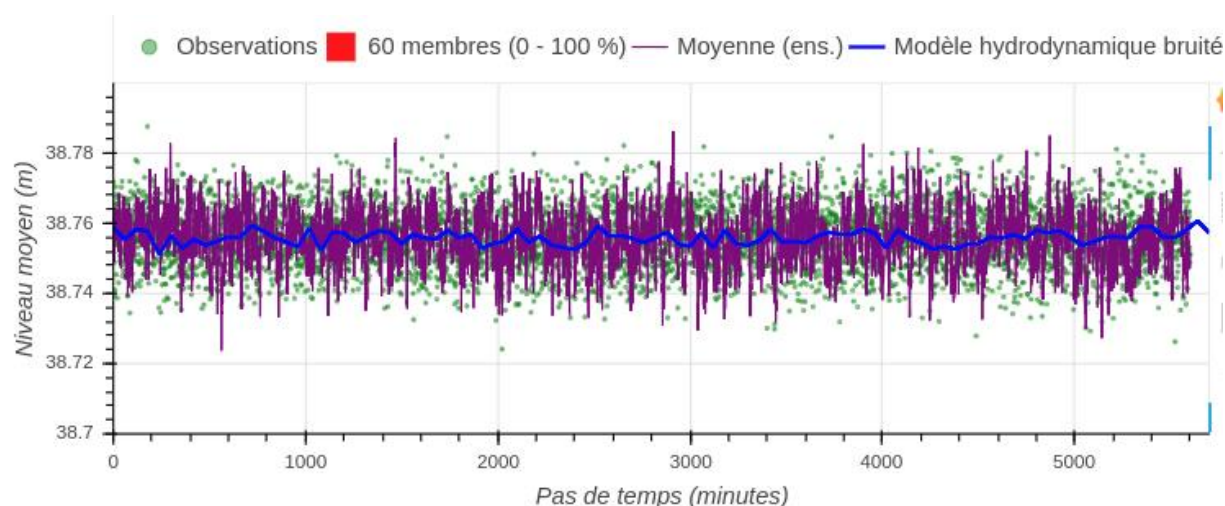


Figure A-15 Comparaison du niveau moyen estimé par le modèle hydrodynamique bruité, les observations et les 60 membres d'ensemble

### A.3.2.3 Comparaisons des résultats

L'erreur moyenne absolue (EMA) et le CRPS permettent d'estimer la moyenne des erreurs respectivement dans un contexte déterministe et probabiliste. L'EMA et le CRPS sont présentés aux équations A-21 et A-22.

$$\frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (\text{A-21})$$

$$\int_{-\infty}^x F(y)^2 dy + \int_x^{\infty} (F(y) - 1)^2 dy \quad (\text{A-22})$$

Ainsi, le tableau A-4 évalue l'EMA et le CRPS pour évaluer la qualité de l'estimation des niveaux selon différentes approches par rapport à la « vérité ».

Tableau A-4 Comparaison des erreurs entre deux conditions d'écoulement (domaines A.2.1.1 et A.2.1.2)

	Modèle seul (cm)	Observations seules (cm)	Filtre de Kalman d'ensemble (cm)
<b>Domaine A.2.1.1</b>			
<b>EMA</b>	2,1	0,7	
<b>CRPS</b>			1,2



Domaine A.2.1.2			
EMA	0,4	0,8	
CRPS			0,7

Il est intéressant de constater que lorsque les conditions d'écoulement sont faibles (domaine A.2.1.1), l'incertitude du modèle est plus importante comparativement aux observations. Pour le domaine A.2.1.2, malgré une erreur relative similaire pour les débits (15%) et une erreur fixe sur les niveaux d'eau, l'incertitude sur les conditions aux frontières du modèle n'impacte pas les niveaux simulés de la même manière. En effet, pour le premier domaine, dans une simulation de 96h, le niveau simulé par le modèle sans assimilation varie de 0,71 à 0,88 comparativement à 38,72 à 38,78 m pour le second domaine, ce qui signifie respectivement une variation maximale des niveaux d'eau de 17 cm par rapport à 6 cm.

L'assimilation de données permet de pondérer les erreurs du modèle et des observations. Pour les deux domaines étudiés, l'erreur causée par les observations est plus faible pour le premier domaine alors qu'elle est comparativement plus élevée pour le second modèle. Dans la réalité, les conditions d'écoulement pourraient varier entre les conditions prescrites par les domaines A.2.1.1 et A.2.1.2. Ce faisant, l'erreur relative des observations relative à celles du modèle varierait également, ce qui pourrait se traduire un CRPS inférieur aux EMA respectifs du modèle et des observations.

## A.4 Discussion

Tel que brièvement présenté dans cette annexe, l'assimilation de données de niveaux d'eau en lacs ou en réservoirs permet d'améliorer la qualité d'une modélisation hydrodynamique lorsque des données externes sont également disponibles. Dans cette annexe, il a été démontré qu'il est possible de recourir au calage dynamique afin de caler le paramètre de frottement dans un modèle hydrodynamique. Également, il a été démontré que l'utilisation du filtre de Kalman d'ensemble peut permettre d'améliorer la qualité du suivi des niveaux d'eau.

Or, cette annexe pose des hypothèses simplificatrices, notamment à l'effet que le domaine d'étude demeure théorique. Il serait pertinent d'évaluer la performance des filtres d'ensembles dans un

contexte de réservoir complexe tel qu'Eastmain-1 (chapitre 3) et surtout, évaluer dans quelle mesure cela est applicable du point de vue de la complexité computationnelle.

## RÉFÉRENCES

Abbasi, M.R., Chegini, V., Sadrasab, M., and Siadatmousavi, S.M. (2019). Improving the Persian Gulf sea surface temperature simulation by assimilating the satellite data via the ensemble Kalman. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 4113–4122.

Agence spatiale européenne (2004). Envisat : Satellite facts. [en ligne] Récupéré le 22 mars 2019 de [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Envisat\\_satellite\\_facts](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Envisat_satellite_facts)

Alejandro Ribés, Adrien Bruneton, and Anthony Geay (2017). SALOME : An open-source simulation platform integrating Paraview.

Allen, G.H., and Pavelsky, T.M. (2018). Global extent of rivers and streams. *Science* 361, 585–588.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome Food Agric. Organ. U. N. 56, e156.

Babb, T. (2015). How a Kalman filter works in pictures. [en ligne] Récupéré le 28 février 2018 de <https://www.bzarg.com/p/how-a-kalman-filter-works-in-pictures/>

Baracchini, T., Chu, P.Y., Šukys, J., Lieberherr, G., Wunderle, S., Wüest, A., and Bouffard, D. (2019). Data assimilation of in-situ and satellite remote sensing data to 3D hydrodynamic lake models. *Geosci Model Dev Discuss.*

Biancamaria, S., Andreadis, K.M., Durand, M., Clark, E.A., Rodriguez, E., Mognard, N.M., Alsdorf, D.E., Lettenmaier, D.P., and Oudin, Y. (2010). Preliminary Characterization of SWOT Hydrology Error Budget and Global Capabilities. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 3, 6–19.

Biancamaria, S., Durand, M., Andreadis, K.M., Bates, P.D., Boone, A., Mognard, N.M., Rodríguez, E., Alsdorf, D.E., Lettenmaier, D.P., and Clark, E.A. (2011). Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Arctic river modeling. *Remote Sens. Environ.* 115, 373–381.

Biancamaria, S., Lettenmaier, D.P., and Pavelsky, T.M. (2016). The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology. *Surv. Geophys.* 37, 307–337.

Birkett, C.M. (2002). Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. *J. Geophys. Res.* 107.

Bonnema, M., and Hossain, F. (2019). Assessing the Potential of the Surface Water and Ocean Topography Mission for Reservoir Monitoring in the Mekong River Basin. *Water Resour. Res.* 55, 444–461.

- Boucher, M.-A. (2011). Le défi de l'intertitude: de la production de prévisions hydrologiques d'ensemble à leur utilisation opérationnelle. Université Laval.
- Bouttier, F., and Courtier, P. (2002). Data assimilation concepts and methods March 1999. Meteorol. Train. Course Lect. Ser. ECMWF.
- Christian Wolff (2017). Radar Basics - Synthetic Aperture Radar. [en ligne] Récupéré le 22 mars 2019 de <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Principle.en.html>
- Crassidis, J.L., and Junkins, J.L. (2011). Optimal estimation of dynamic systems (Chapman and Hall/CRC).
- Cressman, G.P. (1959). An operational objective analysis system. *Mon Wea Rev* 87, 367–374.
- Créaux, J.-F., Jelinski, W., Calmant, S., Kouraev, A., Vuglinski, V., Bergé-Nguyen, M., Gennero, M.-C., Nino, F., Abarca Del Rio, R., Cazenave, A., et al. (2011). SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Adv. Space Res.* 47, 1497–1507.
- Daynou, Mathurin (2016). Révision de la CMP au complexe La Grande (Montréal: Hydro-Québec).
- Delignon, Y. (2009). Filtrage de Kalman. [en ligne] Récupéré le 14 août 2019 de <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/systemes-radars-42591210/filtrage-de-kalman-r1107/>
- Deng, C., Liu, P., Liu, Y., Wu, Z., and Wang, D. (2015a). Integrated Hydrologic and Reservoir Routing Model for Real-Time Water Level Forecasts. *J. Hydrol. Eng.* 20, 05014032.
- Deng, C., Liu, P., Guo, S., Wang, H., and Wang, D. (2015b). Estimation of nonfluctuating reservoir inflow from water level observations using methods based on flow continuity. *J. Hydrol.* 529, 1198–1210.
- Dettmering, D., Schwatke, C., Boergens, E., and Seitz, F. (2016). Potential of ENVISAT Radar Altimetry for Water Level Monitoring in the Pantanal Wetland. *Remote Sens.* 8, 1–21.
- Domeneghetti, A., Schumann, G.J.-P., Frasson, R.P.M., Wei, R., Pavelsky, T.M., Castellarin, A., Brath, A., and Durand, M.T. (2018). Characterizing water surface elevation under different flow conditions for the upcoming SWOT mission. *J. Hydrol.* 561, 848–861.
- Durand, M., Wei, R., and Frasson, R. (2018). River Products from RiverObs (Montréal).
- ESA (2013). Sentinel-3 User Handbook. [en ligne] Récupéré le 30 mars 2019 de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci>
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 45.

Giustarini, L., Matgen, P., Hostache, R., Montanari, M., Plaza, D., Pauwels, V.R.N., De Lannoy, G.J.M., De Keyser, R., Pfister, L., Hoffmann, L., et al. (2011). Assimilating SAR-derived water level data into a hydraulic model: a case study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* *15*, 2349–2365.

Gouvernement du Canada (2013). Modèle numérique de surface du Canada.

Grand Conseil des Cris, Hydro-Québec, and Société de la Baie James (2002). Convention Bounhouman.

Grippa, M., Rouzies, C., Biancamaria, S., Blumstein, D., Cretaux, J.-F., Gal, L., Robert, E., Gosset, M., and Kergoat, L. (2019). Potential of SWOT for Monitoring Water Volumes in Sahelian Ponds and Lakes. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* *12*, 2541–2549.

Häfliger, V., Martin, E., Boone, A., Ricci, S., and Biancamaria, S. (2019). Assimilation of Synthetic SWOT River Depths in a Regional Hydrometeorological Model. *Water* *11*, 78.

Hanssen, R.F. (2010). Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).

Hervouet, J.-M. (2007). Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method (Chichester ; Hoboken, N.J: Wiley).

Hwang, C., Cheng, Y.-S., Han, J., Kao, R., Huang, C.-Y., Wei, S.-H., and Wang, H. (2016). Multi-Decadal Monitoring of Lake Level Changes in the Qinghai-Tibet Plateau by the TOPEX/Poseidon-Family Altimeters: Climate Implication. *Remote Sens.* *8*, 446.

Jalbert, J., Mathevet, T., and Favre, A.-C. (2011). Temporal uncertainty estimation of discharges from rating curves using a variographic analysis. *J. Hydrol.* *397*, 83–92.

Jet Propulsion Laboratory (2001). TOPEX/POSEIDON. [en ligne] Récupéré le 15 novembre 2017 de [https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/PODAAC\\_MGDR](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/PODAAC_MGDR)

Jet Propulsion Laboratory (2008). Ocean Surface Topography Mission/Jason 2. [en ligne] Récupéré le 15 novembre 2017 de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/j/jason-2>

JPL, NASA (2015). Surface Water and Ocean Topography. [en ligne] Récupéré le 15 novembre 2017 de <https://swot.jpl.nasa.gov/>

Karl Hennermann (2019). ERA5 data documentation - Copernicus Knowledge Base - ECMWF Confluence Wiki.

Koblinsky, C.J., Clarke, R.T., Brenner, A.C., and Frey, H. (1993). Measurement of River Level Variations With Satellite Altimetry. *Water Resour. Res.* *29*, 1839–1848.

Larrivée, C. (2010). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques : guide destiné au milieu municipal québécois.

- Lee, H., Durand, M., Jung, H.C., Alsdorf, D., Shum, C.K., and Sheng, Y. (2010). Characterization of surface water storage changes in Arctic lakes using simulated SWOT measurements. *Int. J. Remote Sens.* *31*, 3931–3953.
- LeFavour, G., and Alsdorf, D. (2005). Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model: SRTM AMAZON SLOPE AND DISCHARGE. *Geophys. Res. Lett.* *32*.
- Liu, Y., Weerts, A.H., Clark, M., Hendricks Franssen, H.-J., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D.-J., Schwanenberg, D., Smith, P., van Dijk, A.I.J.M., et al. (2012). Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* *16*, 3863–3887.
- Lu, Z., Kwoun, O., and Rykhus, R. (2007). Interferometric synthetic aperture radar (InSAR): its past, present and future. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* *73*, 217.
- Munier, S., Polebistki, A., Brown, C., Belaud, G., and Lettenmaier, D.P. (2015). SWOT data assimilation for operational reservoir management on the upper Niger River Basin. *Water Resour. Res.* *51*, 554–575.
- NASA and NOAA Altimetric and Ocean Surface Topography Data Information (2017). Altimetric Data Information: Missions | PO.DAAC.
- Neal, J., Schumann, G., Bates, P., Buytaert, W., Matgen, P., and Pappenberger, F. (2009). A data assimilation approach to discharge estimation from space. *Hydrol. Process.* *23*, 3641–3649.
- OECD (2012). OECD Environmental Outlook to 2050. [en ligne] Récupéré le 15 juillet 2016 de <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/modellingworkbehindtheoecdenvironmentaloutlookto2050.htm>
- Pedinotti, V. (2013). Préparation à la mission SWOT (Surface Water Ocean Topography): Apport de l'altimétrie à large fauchée à la modélisation grande échelle des processus hydrologiques et hydrodynamiques en Afrique de l'Ouest.
- Pedinotti, V., Boone, A., Ricci, S., Biancamaria, S., and Mognard, N. (2014). Assimilation of satellite data to optimize large-scale hydrological model parameters: a case study for the SWOT mission. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* *18*, 4485–4507.
- Peng, D., Guo, S., Liu, P., and Liu, T. (2006). Reservoir storage curve estimation based on remote sensing data. *J. Hydrol. Eng.* *11*, 165–172.
- Québec (2002). Politique nationale de l'eau. [en ligne] Récupéré le 3 novembre 2016 de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/politique/>
- Québec (2016). Règlement sur la sécurité des barrages, RLRQ c S-3.1.01, r 1, [en ligne] Récupéré le 3 novembre 2016 de <http://canlii.ca/t/6cbkw>

- Ran, L., and Lu, X.X. (2012). Delineation of reservoirs using remote sensing and their storage estimate: an example of the Yellow River basin, China. *Hydrol. Process.* 26, 1215–1229.
- Riadh Ata, Cédric Goeury, and Jean Michel Hervouet (2014). TELEMAC Modelling System.
- Schlosser, C.A. (2014). The Future of Global Water Stress: An Integrated Assessment.
- Sheng, Y., Song, C., Wang, J., Lyons, E.A., Knox, B.R., Cox, J.S., and Gao, F. (2016). Representative lake water extent mapping at continental scales using multi-temporal Landsat-8 imagery. *Remote Sens. Environ.* 185, 129–141.
- Solander, K.C., Reager, J.T., and Famiglietti, J.S. (2016). How well will the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission observe global reservoirs?: SWOT OBSERVATIONS OF GLOBAL RESERVOIRS. *Water Resour. Res.* 52, 2123–2140.
- Srinivasan, M. (2014). Final SWOT Applications Plan D79129.
- Tarek, M., Brissette, F.P., and Arsenault, R. (2019). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modeling over North-America. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–35.
- Veolia Water (2011). Sustaining growth via water productivity: 2030/2050 scenarios.
- Yamazaki, D., Alsdorf, D., Kim, H., Kanae, S., Oki, T., and Andreadis, K. (2011). Toward global-scale data assimilation using SWOT: Requirements for global hydrodynamics models. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International, (IEEE)*, pp. 3031–3034.
- Yoon, Y., Durand, M., Merry, C.J., Clark, E.A., Andreadis, K.M., and Alsdorf, D.E. (2012a). Estimating river bathymetry from data assimilation of synthetic SWOT measurements. *J. Hydrol.* 464–465, 363–375.
- Yoon, Y., Durand, M., and Merry, C.J. (2012b). DATA ASSIMILATION FOR ESTIMATING RIVER HEIGHT FROM THE UPCOMING SWOT MISSION.
- Yoon, Y., Beighley, E., Lee, H., Pavelsky, T., and Allen, G. (2016). Estimating Flood Discharges in Reservoir-Regulated River Basins by Integrating Synthetic SWOT Satellite Observations and Hydrologic Modeling. *J. Hydrol. Eng.* 21, 05015030.
- Lahoz, W., Khattatow, B. and Menard, R. (2010). Data Assimilation : Making Sense of Observations(Springer Berlin Heidelberg).